

Grado Universitario en
Ingeniería en Tecnologías Industriales
(2017-2018)

Trabajo Fin de Grado

Diseño de la estructura de un módulo habitable permanente en Marte.

Julia Molinero Sanz

Tutor:

Carlos Santiuste Romero

Leganés, Septiembre-2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN.

El trabajo que se presenta a continuación reúne el estudio y diseño de un módulo habitable para asentarse en el planeta Marte. El principal objetivo ha sido desarrollar un habitáculo que reúna las características y rasgos necesarios para conseguir hacer frente a las condiciones atmosféricas y geológicas, así como satisfacer las necesidades humanas que se generan en el espacio.

Este estudio se ha basado en la idea de aprovechar los propios recursos del planeta y, por ello, el planteamiento principal ha sido construir un habitáculo subterráneo aprovechando la superficie rocosa de Marte. De este modo, el módulo ha sido diseñado de tal forma que cuenta con una parte subterránea habilitada para el desarrollo de la vida de la tripulación y una parte intermedia de acceso, la cual ha sido el punto clave a desarrollar en este trabajo.

La parte de acceso o entrada al módulo conecta el espacio exterior con el habitable. El problema que se presenta y se persigue solucionar a lo largo del trabajo es el desarrollo de las puertas de acceso de tal modo que soporten las condiciones bajo las que se encuentran y proporcionen la seguridad, comodidad y utilidad para las que han sido diseñadas.

El proceso de diseño de estas puertas de entrada se ha basado en estudiar las fuerzas a las que están sometidas y obtener la posibilidad más óptima respecto a materiales y formas. Se ha estudiado la factibilidad de diferentes geometrías de la entrada (rectangular y circular) y la posibilidad de utilizar diferentes materiales isótropos (Aluminio, Acero, Titanio) o compuestos (Fibra de Carbono) y, por último se ha llevado a cabo una mejora de la solución añadiendo refuerzos y estudiando las prestaciones y resultados que estos producen.

Finalmente, una vez analizadas las diferentes variantes y posibilidades, se han comparado los resultados obtenidos y se ha elegido la opción más óptima.

Palabras clave: Marte, habitable, placa, diseño, materiales compuestos, Método de Elementos Finitos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Contenidos del documento.	5
2. ANTECEDENTES.	7
2.1 Módulos habitables en Marte.	7
2.2 Condiciones en Marte.....	8
2.3. Fundamentos teóricos y prácticos.....	9
2.3.1 Materiales Compuestos.	9
2.3.2 Fibra de Carbono.	11
2.3.3 Laminado.....	13
2.3.4 Teoría de Placas.	15
2.3.5 Método de los Elementos Finitos.	19
2.3.6 Herramienta Abaqus.	19
2.3.7 Utilización de Abaqus para el proyecto presente.	21
3. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO.....	26
4. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA.	30
4.1 Descripción del problema.....	30
4.2 Casos estudiados.....	33
4.3 Métodos utilizados.....	35
4.4 Criterios para el dimensionamiento.....	36
5. FASES DE DISEÑO.	38
5.1 Placa circular.....	39
5.1.1 Placa circular. Materiales isótropos.....	39
5.1.2 Placa circular. Materiales Compuestos.....	44
5.1.3 Placa circular con refuerzo.	49
5.1.3.1.....	49
5.1.3.2.....	54
5.2 Placa rectangular.....	57
5.2.1 Placa rectangular. Materiales simples.....	58
5.2.2 Placa rectangular. Material compuesto.....	63
5.2.3 Placa rectangular con refuerzo.	67
5.2.3.1 Placa rectangular con refuerzo. Material simple.....	68

5.2.3.2.....	73
6. RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.	75
6.1 Selección de propuesta óptima.	75
6.2 Desarrollo y mejora de la opción seleccionada.	77
6.3. Presentación de la solución final.	79
7. PRESUPUESTO.....	81
8. IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO.	82
9. MARCO REGULADOR.....	83
10. CONCLUSIONES.....	84
10.1. Objetivos cumplidos.	84
10.2. Líneas futuras de trabajo.....	85
11. BIBLIOGRAFÍA.	86

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Características la Tierra y Marte.....	8
Tabla 2.2 Clasificación de matrices en materiales compuestos.....	10
Tabla 2.3 Materias primas que conforman los materiales compuestos.....	11
Tabla 2.4 Tipos de fibra de carbono.....	12
Tabla 4.1 Propiedades de materiales isótropos.....	32
Tabla 4.2 Propiedades de la fibra de carbono.....	32
Tabla 5.1 Espesor de placa circular con materiales isótropos.....	41
Tabla 5.2 Masa de placa circular con materiales isótropos.....	42
Tabla 5.3 Tensiones placa circular con materiales compuestos.....	46
Tabla 5.4 Ecuaciones del criterio de tensiones para placa circular con materiales compuestos.....	48
Tabla 5.5 Desplazamientos máximos para placa circular con nervios de material isótropo.....	54
Tabla 5.6 Espesor de placa rectangular materiales isótropos.....	60
Tabla 5.7 Masa de placa rectangular con materiales isótropos.....	60
Tabla 5.8 Tensiones placa rectangular con materiales compuestos.....	64
Tabla 5.9 Ecuaciones del criterio de tensiones para placa rectangular con materiales compuestos.....	66
Tabla 5.10 Desplazamientos máximos para placa rectangular con nervios de materiales isótropo.....	72
Tabla 6.1 Recopilación de resultados.....	75
Tabla 6.2 Comparación placa rectangular seleccionada.....	79
Tabla 6.3 Características solución final.....	80
Tabla 7.1 Presupuesto mano de obra.....	81
Tabla 7.2 Presupuesto material y equipos.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1.1 Entrada al habitáculo, puerta objeto de estudio.....	2
Fig. 2.1 Deformaciones y tensiones en un laminado. [11].....	14
Fig. 2.2 Secuencia de apilamiento de un lámina cualquiera. Biblioteca virtual Universidad de Sevilla. [12].....	15
Fig. 2.3 Coordenadas y plano medio en placa. [14].....	16
Fig. 2.4 Sólido mallado. Recuperado de FEMAP [19].....	19
Fig. 2.5 Creación de una part.....	21
Fig. 2.6 Ejemplo part placa del proyecto.....	21
Fig.2.7 Ejemplo part nervio tipo 1 del proyecto.....	22
Fig. 2.8 Empaquetamiento del laminado en Abaqus.....	22
Fig.2.9 Ejemplo part creada una vez realizado el Merge.....	23
Fig. 2.10 Condiciones de contorno y cargas en Abaqus.....	24
Fig.2.11 Mallado en Abaqus.	24
Fig.3.1 Zona exterior y zona intermedia.....	27
Fig.3.2 Zona interior.	28
Fig. 4.1 esquema de la placa empotrada y sometida a presión uniforme.....	31
Fig. 4.2 Esquema de la sujeción de la puerta en posición cerrada.....	31
Fig. 4.3 Diseños estudiados.....	34
Fig. 4.4 Dimensiones de los diseños estudiados.....	34
Fig. 5.1 Desplazamientos en placa circular de Aluminio [m].....	43
Fig.5.2 Tensión en placa circular de Aluminio. [Pa]	44
Fig. 5.3 Esquema del apilamiento del laminado con 13 repeticiones.....	46
Fig. 5.4 Tensión S11 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].....	47
Fig.5.5 Tensión S22 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].	47
Fig. 5.6 Tensión S12 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].	48
Fig. 5.7 Desplazamientos en placa circular de fibra de carbono [m].....	49
Fig. 5.8 Nervios tipo 1 en placa circular.....	50
Fig. 5.9 Nervios tipo 2 en placa circular.....	50
Fig.5.10 Nervios tipo 3 en placa circular.....	51
Fig. 5.11 Dimensiones nervios tipo 1 placa circular.....	51
Fig.5.12 Desplazamientos con nervios tipo 1 placa circular de Aluminio.[m].....	52

Fig.5.13 Dimensiones nervios tipo 2 placa circular.	52
Fig.5.14 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa circular de Aluminio [m].....	53
Fig.5.15 Dimensiones nervios tipo 3 placa circular.	53
Fig.5.16 Desplazamientos con nervios tipo 3 placa circular de Aluminio [m].....	54
Fig.5.17 Tensión S11 en placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2 para espesor con 13 repeticiones [Pa].....	55
Fig.5.18 Tensión S11 en placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2 para espesor con 14 repeticiones [Pa].....	56
Fig.5.19 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa circular de fibra de carbono [m]....	57
Fig.5.20 Desplazamientos en placa rectangular de Aluminio [m].....	61
Fig.5.21 Tensiones en placa rectangular de Aluminio [Pa].....	62
Fig.5.22 Tensión S11 en lámina B de placa rectangular [Pa].....	64
Fig.5.23 Tensión S22 en lámina A de placa rectangular [Pa].....	65
Fig.5.24 Tensión S12 en lámina C de placa rectangular [Pa].....	65
Fig.5.25 Tensión S12 en lámina D de placa rectangular [Pa].....	66
Fig.5.26 Desplazamientos en placa rectangular de fibra de carbono [m].....	67
Fig.5.27 Nervios tipo 1 en placa rectangular.....	68
Fig.5.28 Nervios tipo 2 en placa rectangular.....	68
Fig.5.29 Nervios tipo 3 en placa rectangular.....	69
Fig.5.30 Dimensiones nervios tipo 1 placa rectangular.....	69
Fig.5.31 Desplazamientos con nervios tipo 1 placa rectangular de Aluminio [m].....	70
Fig.5.32 Dimensiones nervios tipo 2 placa rectangular.....	70
Fig.5.33 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa rectangular de fibra de carbono [m].....	71
Fig.5.34 Dimensiones nervios tipo 3 placa rectangular.....	71
Fig.5.35 Desplazamientos con nervios tipo 3 placa rectangular de Aluminio [m].....	72
Fig.5.36 Tensión S11 en placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2 [Pa].	73
Fig.5.37 Desplazamientos en placa rectangular de fibra de carbono con nervios [m]...	74
Fig.6.1 Diseño seleccionado de placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo.....	76
Fig.6.2 Diseño final mejorado.....	77
Fig.6.3 Tensión S11 en diseño final mejorado [Pa].....	77
Fig.6.4 Desplazamientos en diseño final mejorado [m].....	78

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Motivación.

La investigación, la exploración y el estudio sobre la posibilidad de llegar a diferentes planetas, conocer más sus características y condiciones e incluso establecerse en ellos es un tema que lleva presente durante décadas dentro de una amplia comunidad de científicos.

Como afirma el astrofísico Ulisses Barres “La exploración del espacio responde a un interés intrínseco al ser humano, los hombres tienen que explorar” Por ello, desde el comienzo de la especie humana, el interés por conocer más allá de las fronteras terrestres ha hecho posible el avance en el conocimiento, herramientas y capacidad de desarrollo al que hemos llegado en la actualidad.

Marte es un planeta que reúne una serie de características similares a las de la Tierra y, por ello, se encuentra en uno de los principales focos de investigación. Su atmósfera guarda similitudes con la terrestre y su geología comparte también un gran número de características con las de la Tierra. Por estas razones el Planeta Rojo se ha convertido a lo largo de los años en el escenario principal para el estudio de futuros viajes tripulados y el posible asentamiento del ser humano.

Este trabajo se ha llevado a cabo con ánimo de conocer más sobre los avances logrados por la ciencia, estudiar y valorar las necesidades que el ser humano requeriría al habitar el planeta y desarrollar una parte de lo que supondría llevar a cabo la realización de un módulo que permitiese al ser humano establecerse en Marte.

El Planeta Rojo ha sido explorado durante décadas. Desde la primera nave enviada por la NASA que sobrevoló el planeta en 1965, *Mariner 4*, que permitió captar imágenes que revelaron la superficie de color óxido, repleta de cráteres y que evidenciaba la existencia de agua en el pasado [1], hasta la actual nave Mars Express que envía señales de radio a la superficie del planeta de tal forma que rebotan en diferentes profundidades y permiten conocer la composición del subsuelo. [2]

Gracias a estos avances conseguidos, en la actualidad es posible conocer la geología marciana cada vez con mayor precisión y esto nos permite saber que Marte posee una corteza rocosa que alberga montañas, cráteres, valles, cuevas subterráneas, desiertos...

Debido a estos logros y al futuro tan esperanzador que hay en la actualidad de seguir conociendo estas características y propiedades geológicas, numerosos científicos han sido motivados por el estudio de la creación de posibles asentamientos humanos en el subsuelo del planeta. Por estas razones, surgió la idea de llevar a cabo el presente proyecto partiendo de un módulo habitable subterráneo, el cual también permitiría que la tripulación estuviese a salvo de las tormentas y la alta radiación que se presentan en la superficie marciana.

Este módulo subterráneo consta de una zona de entrada que conforma la zona de tránsito entre el espacio exterior y la zona interior. Esta zona de entrada o tránsito se trata de un túnel situado entre dos puertas que sirve como área de conexión y seguridad ante la intemperie. Por otro lado, la zona interior cuenta con las dependencias para el desarrollo de la vida de los tripulantes.

Lejos de intentar abarcar todo lo que implicaría realizar un módulo real completo condicionado y habilitado para su uso en Marte, este trabajo se ha enfocado en orientar la idea para así hacer uso de las herramientas aprendidas en el área de Teoría de Estructuras y, de este modo, investigar, asimilar y ahondar más en conceptos de interés que se encuentran fuera del itinerario lectivo del Grado en Tecnologías Industriales como son la Teoría de placas, el estudio de estructuras con materiales compuestos y el Método de los Elementos Finitos (MEF).

De este modo, el proyecto se ha basado en realizar un proceso de diseño para la zona de entrada y, en concreto, para las puertas que la conforman.

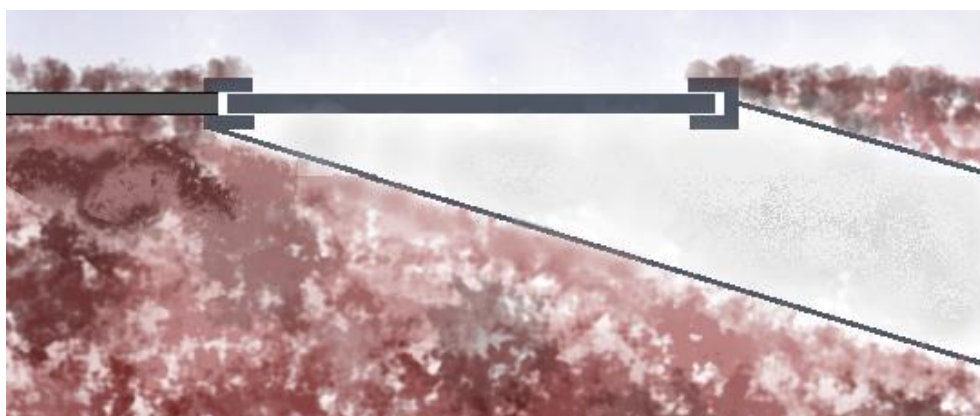


Fig. 1.1 Entrada al habitáculo, puerta objeto de estudio.

El diseño de las puertas de entrada se ha llevado a acabo utilizando diferentes métodos y formas de análisis que han permitido estudiar las prestaciones que ofrecen diferentes geometrías, materiales y tipos de refuerzos. Las puertas de entrada del proyecto se encuentran bajo unas condiciones precisas que han determinado sus características finales.

Para el proceso de diseño de las puertas se han estudiado diferentes geometrías, materiales isótropos, materiales compuestos y, a su vez, se ha llevado a cabo el estudio con diferentes métodos: en primer lugar de forma analítica, en los casos que ha sido posible y, en segundo lugar, se ha hecho uso del Método de los Elementos Finitos. Para este último se ha implementado la herramienta Abaqus que nos permite estudiar los casos más complejos en los que el método analítico no ofrece solución.

1.2 Objetivos.

Con la realización de este trabajo se ha perseguido el objetivo de reunir y analizar información para estudiar la posibilidad de crear un módulo habitable en Marte, así como llevar a cabo un proceso de diseño que permita comparar con diferentes herramientas y métodos las posibles soluciones. Para el desarrollo de un habitáculo que permita asentarse en el planeta ha sido necesario tener en cuenta numerosos factores, variables y condiciones así como asentar unos criterios que han permitido conseguir una solución factible.

Este proyecto ha perseguido tres objetivos generales:

- El primer objetivo global del trabajo ha sido recopilar y conocer las características e información sobre Marte, que se encuentran al alcance del ser humano gracias a las investigaciones que se han llevado a cabo durante las últimas décadas. Este desarrollo ha permitido conocer la situación de Marte, su atmósfera, propiedades, geología... así como comparar estas características con las terrestres. La recopilación de esta información ha servido para poder llegar a deducciones que han hecho posible crear una idea inicial con fundamento sobre la que poder empezar a trabajar.
- Por otro lado, el siguiente objetivo ha sido planificar y analizar las posibilidades que pueden ser estudiadas en el proceso de diseño (geometrías, materiales, formas...) así como establecer los criterios de estudio que nos han permitido descartar ideas y planteamientos poco ventajosos y quedarnos con la opción que ha proporcionado una mejor solución al problema que ha sido propuesto.
- Por último, cabe destacar un objetivo importante que ha marcado el desarrollo de este trabajo. Se trata del interés perseguido en utilizar nuevos conceptos como son la Teoría de Placas o el estudio de estructuras de materiales compuestos para así ampliar conocimientos sobre el área de Teoría de Estructuras.

Partiendo de la base de los tres objetivos principales que engloban el proyecto, a continuación se muestra una descripción de los objetivos prácticos que se han perseguido para llevar a cabo el proceso de diseño:

Una vez recopilada la información necesaria y tomada la decisión de llevar a cabo un módulo subterráneo, el objetivo se ha centrado en el diseño de las puertas de tránsito del habitáculo. De este modo, se ha llevado a cabo el estudio de diferentes posibilidades en cuanto a geometría, materiales y tipos de refuerzo, lo que ha permitido ir dotando a la solución de las características más ventajosas.

El primer objetivo ha sido el estudio de la puerta como una placa simple a la que se le ha dotado de una geometría circular. Para esta primera propuesta se ha realizado el estudio analítico utilizando tres materiales isótropos diferentes. De ellos, el que mejores soluciones analíticas ha conseguido, ha sido estudiado a su vez por el Método de

Elementos Finitos. De este modo, ha sido posible compararlo con los resultados que aporta la utilización de fibra de carbono en su lugar. Este proceso se ha basado en dimensionar el espesor de cada configuración para así descartar las opciones menos ventajosas.

En el siguiente paso se ha pretendido estudiar las posibilidades de mejorar las dos opciones materiales que se encontraban aún en estudio (material isótropo seleccionado y fibra de carbono). Ambas configuraciones se han dotado de diferentes tipos de nervios en forma de refuerzo de los cuales ha sido elegido el tipo que mejores resultados estructurales aportaba.

Una vez que han sido obtenidos los resultados de las diferentes configuraciones de placa circular, se ha optado por realizar el mismo proceso tomando como punto de partida una geometría rectangular para la placa. De este modo, se han estudiado de forma semejante todas las variantes presentadas anteriormente para así poder comparar con los mismos criterios las posibles ventajas y desventajas que ofrece cada combinación de geometría, material y tipo de refuerzo.

A continuación se muestra de forma esquemática todas las configuraciones a las que se ha pretendido dar solución para poder llegar a una conclusión final:

- Placa circular con materiales isótropos.
 - Aluminio.
 - Acero.
 - Titanio.
- Placa circular con material compuesto.
 - Fibra de Carbono.
- Placa circular con material isótropo seleccionado y con nervios.
 - Nervios tipo 1.
 - Nervios tipo 2.
 - Nervios tipo 3.
- Placa circular con material compuesto y con nervios.
 - Nervios tipo: el seleccionado en el apartado anterior.
- Placa rectangular con materiales isótropos.

- Aluminio.
- Acero.
- Titanio.
- Placa rectangular con material compuesto.
 - Fibra de Carbono.
- Placa rectangular con material isótropo seleccionado y con nervios.
 - Nervios tipo 1.
 - Nervios tipo 2.
 - Nervios tipo 3.
- Placa rectangular con material compuesto y con nervios.
 - Nervios tipo: el seleccionado en el apartado anterior.

Una vez que ha sido realizada la selección del tipo de puerta que obtiene mejores resultados, el último objetivo se ha centrado en la mejora de la misma para así optimizarla y obtener la solución final.

1.3 Contenidos del documento.

La memoria que se presenta se encuentra dividida en capítulos que recogen y organizan la información siguiendo un orden acorde al proceso de diseño. Los puntos desarrollados a lo largo del documento han sido los siguientes:

- Introducción. Engloba el encabezamiento y el preámbulo del proyecto reuniendo la motivación, los objetivos y presentación de las partes del proyecto.
- Antecedentes. Pretende establecer un punto de partida en base a los avances y estudios que existen respecto al tema tratado para así poder desarrollar la idea descrita a partir del conocimiento sobre los logros conseguidos en este ámbito.
- Fundamentos teóricos y prácticos. Presenta las bases teóricas estudiadas y utilizadas para el desarrollo del proyecto, así como los procedimientos prácticos y herramientas utilizadas.
- Descripción del módulo. Presenta la idea a la que se pretende dar solución y muestra las partes y características de las que constará el espacio habitable.
- Presentación del problema. Establece los criterios utilizados para el estudio así

como las simplificaciones utilizadas y la descripción del problema que se propone.

- Fases de diseño. Muestra el estudio que ha sido realizado con todas las posibilidades y resultados obtenidos para cada caso. Las soluciones que se muestran en este apartado han sido utilizadas para la selección de la opción más óptima.
- Desarrollo de la solución. En este apartado se pretende reunir de forma sencilla, a modo de recopilación, los resultados obtenidos en cada caso. Además se ha llevado a cabo la selección de la opción más ventajosa en base a los criterios establecidos así como el estudio de la mejora de la misma.
- Presupuesto. Se pretende dar un presupuesto general de los costes que conllevaría la fabricación de la puerta.
- Impacto socio-económico. Muestra un análisis social y económico del impacto que tienen los avances conseguidos respecto al objetivo de explorar Marte.
- Marco regulador. Se muestran bases impartidas por la NASA en proyectos relacionados con el tratado en la memoria presente.
- Conclusiones. Incluye una serie de reflexiones finales y deducciones a las que se ha llegado después del proceso de diseño seguido, donde se pretende mostrar los objetivos cumplidos y las líneas futuras de trabajo.
- Bibliografía. Reúne la recopilación de las fuentes de información.

2. ANTECEDENTES.

2.1 Módulos habitables en Marte.

El objetivo de la colonización de Marte ha estado presente en los últimos años dentro de un gran colectivo de científicos. En especial, la estrategia de la NASA ha centrado su propósito para las próximas dos décadas en una misión a Marte, no solo para visitar, sino para colonizar el planeta. [3]

El estudio de módulos habitables en Marte es un complejo que admite multitud de variantes. A lo largo de las últimas décadas se han realizado múltiples estudios de la mano de diferentes instituciones: estudios de la NASA, concursos promovidos por ellos mismos o investigaciones por parte de las universidades más prestigiosas de todo el mundo.

A medida que se conoce más sobre el planeta, la ciencia y la investigación siguen aportando esperanza para conseguir el objetivo de habitar el planeta. Actualmente existen proyectos futuristas en funcionamiento que llevan a cabo estudios para poblar Marte, como es el denominado Mars One. Este es un proyecto privado de una compañía neerlandesa fundada por Bas Lansdorp que persigue preparar una misión espacial para establecer a personas en Marte de forma permanente a partir del año 2023. [4]

Por otro lado, existen proyectos promovidos por la NASA como el denominado “Next Space Technologies for Exploration Partnerships-2” Este proyecto fue desarrollado a partir del concurso 3D Printed Habitat Challenge y de él han salido diferentes propuestas que consiguen un nivel alto de factibilidad.

Los recursos más innovadores utilizados en las últimas investigaciones son técnicas como estructuras neumáticas, diseño digital y utilización de la impresión 3D. Por un lado, las estructuras neumáticas han sido un foco muy importante de estudio ya que consiguen un volumen habitable mayor con un peso muy bajo. Estas estructuras hinchables se realizan con fibras Kevlar lo que hace necesaria la creación de un recubrimiento que reduzca la exposición a la radiación, las condiciones climáticas y la atmósfera de Marte.

Dentro de este tema es interesante destacar el proyecto TransHab, propuesto por la NASA para el desarrollo de hábitats hinchables en el espacio. El estudio de este proyecto continuó de mano de la compañía Bigelow Aerospace ya que este dejó de ser estudiada por la NASA debido a problemas de presupuesto. [5]

Por otro lado, el BEAM (*Bigelow Expandable Activity Module*) es un módulo hinchable experimental de la empresa Bigelow que será utilizado por la estación espacial internacional. Las estaciones espaciales hasta ahora han utilizado estructuras rígidas para proveer los hábitats presurizados para las tripulaciones, pero el concepto de módulos expandibles para su uso espacial supondría un abaratamiento en la confección

de futuras estaciones espaciales, bases en otros cuerpos celestes, o hábitats en vuelos espaciales interplanetarios. Bigelow ya envió al espacio los módulos hinchables como el Génesis I y II en 2006 y 2007, y ahora con BEAM se pretende ahondar más en esta tecnología. [5]

2.2 Condiciones en Marte.

Marte, también conocido como el Planeta Rojo, es un planeta generalmente frío, con temperaturas extremas e importantes cambios según las diferentes zonas geográficas. Su superficie es rocosa y presenta elementos geográficos como son montañas, volcanes, valles, desiertos y cráteres. A menudo se desarrollan fuertes tormentas de polvo así como tornados y fuertes vientos. [6]

Las condiciones y características de Marte hacen pensar que pudo haber vida en el pasado y, a pesar de las diferencias respecto a la Tierra, este planeta tiene también muchas similitudes que captan la atención de los investigadores. Actualmente se persigue de forma activa la posibilidad de explorar, habitar y asentar a personas humanas en el planeta en las próximas décadas. Para poder entender tanto las carencias como las ventajas de Marte en cuanto a la factibilidad de albergar seres humanos, se muestran descritas en la tabla 2.1 las diferencias entre las características de ambos planetas:

TABLA 2.1 CARACTERÍSTICAS LA TIERRA Y MARTE.

Características	<u>La Tierra</u>	<u>Marte</u>
Duración de un año	365,25 días	687 días terrestres
Duración de un día	23horas 56minutos	24 horas 37minutos
Gravedad	9,807m/s ²	3,711m/s ²
Temperatura máxima	58°C	30°C
Temperatura mínima	-88°C	-120°C
Atmósfera	78,09% Nitrógeno (N ₂)	96% CO ₂
	20,95% Oxígeno (O ₂)	1,93% Argón (Ar)
	0,93% Argón (Ar)	1,89% Nitrógeno (N ₂)
	0,039% CO ₂	0,145% Oxígeno (O ₂)
	Otros	Otros
Presión atmosférica	101300 Pa	1155 Pa

. Fuente:[En línea] Mars Facts. Nasa Science. Mars Exploration Program. [7]

En el planeta se dan estaciones de igual manera que en la Tierra debido a la inclinación similar de su eje de rotación, de tal forma que la superficie sufre importantes cambios estacionales de temperatura.

Marte cuenta con una atmósfera tenue compuesta en su mayoría por dióxido de carbono. Por otro lado, la ligereza de la atmósfera hace que esta no sea capaz de absorber la radiación ultravioleta del Sol y, por lo tanto, llegue a la superficie marciana de forma intensa, lo que provoca la destrucción de las moléculas orgánicas. Del mismo modo, esto supone un alto factor de riesgo para una persona que se asiente en el planeta y un importante obstáculo para la exploración en Marte. [8]

La debilidad de la atmósfera y la baja densidad de la misma hace que la presión en la superficie de Marte sea mucho menor que la terrestre, factor crítico para la presencia de seres humanos que no soportarían estas condiciones.

Enfocándonos en el objetivo de habitar el planeta es importante tener en cuenta todas estas diferencias y factores que serán los puntos que condicionen las características, el diseño y el proceso de desarrollo de módulos para asentarse en Marte.

2.3. Fundamentos teóricos y prácticos.

2.3.1 Materiales Compuestos.

Conforme aumenta la necesidad del ser humano de disponer de soluciones tecnológicas cada vez más exigentes, también surge la necesidad de disponer de nuevos materiales que ofrezcan cada vez mejores prestaciones.

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes, de forma que las propiedades del material final sean superiores que las de los componentes por separado.

El uso de materiales compuestos permite prescindir de materiales más clásicos. Así, por ejemplo, es posible fabricar materiales compuestos que poseen mejores propiedades específicas que muchos metales. Se consiguen piezas más ligeras manteniendo altas cualidades. A esto se debe la gran importancia ingenieril de los materiales compuestos, especialmente en automoción, aeronaves y estructuras.

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por varias fases: una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría.

En base a ello podemos diferenciar tres grandes grupos:

- 1) Materiales compuestos reforzados con partículas.
- 2) Materiales compuestos reforzados con fibras.

3) Materiales compuestos estructurales.

Por otro lado, existe otra clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

- 1) Compuestos de matriz metálica (MMC)
- 2) Compuestos de matriz cerámica (CMC)
- 3) Compuestos de matriz polimérica (PMC).

La matriz es la parte del material compuesto que se presenta de forma continua y actúa como ligante. A continuación se muestra una clasificación de los tipos de matrices.

TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN DE MATRICES EN MATERIALES COMPUESTOS.

Inorgánicas	Cemento, geopolímeros, yeso	
	Matrices cerámicas	
Orgánicas	Matrices metálicas	
	Termoestables	Epoxi, vinilester, poliéster, fenólica, bismaleidas, poliamidas, polieteramida..
	Termoplásticas	PVC, copolímeros de estireno, polietileno PE, polipropileno PP, policarbonato PC, PMMA, acetato, poliestireno PS, poliamida...

Fuente: Materiales Compuestos I. Antonio Miravete. [9]

Además existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación. A continuación se muestran las materias primas que componen un material compuesto.

TABLA 2.3 MATERIAS PRIMAS QUE CONFORMAN LOS MATERIALES COMPUESTOS.

Fibras	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
Matrices	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, polietileno)
	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres, Bismaleimidas, Polieteramida)
Núcleos	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, Polieterimida, PET, Nilon, Poliamida, PEEK, PAI, PAS)
	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (Poliuretano, Poliestireno, PVC)
Adhesivos	Sándwich Tejido 3D, Madera de Bals
Recubrimientos	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos
	Cerámicos, Fenólicos, Intumescentes, Mats

Fuente: Materiales Compuestos I. Antonio Miravete. [9]

2.3.2 Fibra de Carbono.

Cabe destacar que los materiales compuestos de mayor importancia tecnológica son los materiales de matriz polimérica reforzados con fibra. En este proyecto nos centraremos en la fibra de carbono con matriz Epoxi, ya que será la estudiada en algunos de los apartados del proceso de diseño.

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica y rigidez es determinante para obtener las principales propiedades mecánicas.

Las fibras de carbono se fabrican mediante pirólisis controlada y ciclización de precursores de cierta fibra orgánica, el más común es poliacrilonitrilo (PAN). [9] Es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o

fatiga. También, en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas.

En general, la fibra de carbono se caracteriza por tener las siguientes cualidades:

- Elevada resistencia mecánica y módulo de elasticidad.
- Baja densidad.
- Alta resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico.
- Resistencia a las variaciones de temperatura. [10]

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento se identifican tres tipos diferentes de fibra de carbono:

-Fibra de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.

-Fibra de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.

-Fibra de carbono III es la más barata, su rigidez es menor pero tiene buena asistencia. [9]

TABLA 2.4 TIPOS DE FIBRA DE CARBONO.

PROPIEDADES	Fibra de alta resistencia HR	Fibra de alto módulo HM	Fibra de Carbono III
Diámetro del hilo (μm)	8	7	0,7 – 0,8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2,6 - 5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico.	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,56	2,56

Fuente: Materiales Compuestos I. Antonio Miravete. [9]

Los filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro típico que oscila entre 5 y 8 μm y están combinados en mechas que contienen entre 5000 y 12000 filamentos. Estos filamentos unidos a matrices termoestables como puede ser la resina Epoxi consiguen características óptimas muy útiles en el ámbito ingenieril.

Para el estudio de este proyecto nos centraremos en las matrices orgánicas y en especial en las termoestables, puesto que la resina Epoxi pertenece a este grupo.

El tipo de resinas más importantes utilizado en materiales compuestos son las resinas líquidas termoestables. Los polímeros termoestables se fabrican normalmente a partir de precursores líquidos o semisólidos que endurecen irreversiblemente. Esta reacción química es conocida como polimerización y al final del proceso la resina líquida se convierte en un sólido duro con eslabones químicos que producen una red de cadenas de polímeros. Las unidades moleculares, la longitud y densidad de los eslabones determinarán las propiedades mecánicas del material. El proceso de curado también tendrá un papel importante para alcanzar su estructura reticulada y sus propiedades óptimas. [9]

La química de las resinas epoxi se basa en la capacidad del radical epóxido para reaccionar con un amplio rango de radicales orgánicos y efectuar enlaces cruzados sin aparición de un producto condensado. La resina se cura por reacción con un agente de curado que se controla con catalizadores y aceleradores. Cabe destacar que los sistemas de resinas comerciales son a menudo una mezcla compleja de resina, agentes de curado, catalizadores, modificadores y otros aditivos.

Las resinas epoxi son termoestables que contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glícidas. Debido a esto, la resina obtiene condiciones de buena adherencia, baja contracción durante polimerización y son especialmente resistentes. Se caracterizan a su vez por tener una baja retracción, un buen comportamiento a temperaturas elevadas y una buena resistencia a los agentes químicos.

2.3.3 Laminado.

La naturaleza anisótropa y heterogénea de los materiales compuestos les confiere un comportamiento diferente al de los materiales estructurales convencionales. Por ello, es conveniente conocer con detalle su comportamiento mecánico.

En estructuras construidas con materiales compuestos, la lámina constituye la unidad básica del laminado. Este laminado es anisótropo, esto quiere decir que a diferencia de los materiales simples isótropos, las propiedades cambian en diferentes direcciones y, por tanto, las tensiones.

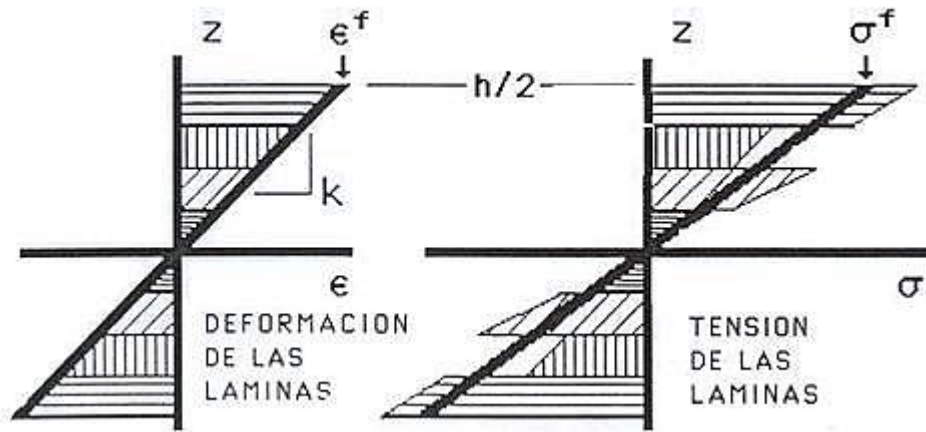


Fig. 2.1 Deformaciones y tensiones en un laminado. [11]

Existen diferentes tipos de láminas:

-Lámina con fibras largas unidireccionales. Todas las fibras están orientadas en una única dirección. Tienen isotropía transversal, es decir, las mismas propiedades en todas las direcciones de un plano perpendicular al de las fibras.

-Lámina tipo tejido. Todas las fibras se encuentran orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí. La urdimbre (longitudinales) se entrelaza con la trama (transversales). Tiene propiedades ortotrópicas.

-Lámina tipo mat. Compuesta por fibras orientadas aleatoriamente. Se considera isotropía en el plano de la lámina. [9]

Las láminas tendrán unas características elásticas que dependerán del volumen de fibra y volumen de matriz que contengan.

Como el espesor de la lámina es muy pequeño, las configuraciones utilizadas en estructuras se basan en una agrupación secuencial de láminas adheridas entre sí conocido como laminado.

Cabe destacar que para el estudio de laminados se establecen las siguientes hipótesis:

- Cada lámina se considera un material cuasi-homogéneo y ortótropo.
- Las láminas tienen un comportamiento elástico lineal hasta rotura.
- Las láminas están perfectamente unidas entre sí.
- El laminado y todas las láminas se encuentran en un estado de tensión plana o flexión.
- Los desplazamientos y sus derivadas son pequeños.
- Se verifica la hipótesis de Kirchhoff: una sección normal al plano medio del laminado permanece plana y normal a la superficie media deformada. Por tanto $\gamma_{yz}=0$ $\gamma_{xz}=0$ $\epsilon_z=0$

El laminado está formado por un conjunto de capas adheridas entre sí que se conforman con una secuencia de apilamiento determinada. Esta secuencia de apilamiento determina el tipo de laminado con el que se trabaja.

Existen diferentes tipos de laminado que generalmente se constituyen por patrones de secuencia de láminas. La secuencia de apilamiento de las láminas o esquema de laminación se describe entre corchetes. Si se trata de láminas del mismo espesor se representa de la siguiente forma $[a / b / c \dots]$ donde a , b y c son ángulos en grados que representan las orientaciones de cada capa consecutivamente. Si, por el contrario, cada lámina tiene espesores distintos se añadirá el espesor al lado de cada ángulo como se muestra a continuación $[t_1 a / t_2 b / t_3 c \dots]$. [11]

Cabe destacar la posibilidad de que un laminado sea simétrico, antisimétrico o asimétrico. En el caso particular de que sea laminado simétrico, las láminas presentan la misma disposición respecto al plano medio del laminado y se indica con el subíndice s en el esquema de laminado $[a / b / c \dots]_s$. [11]

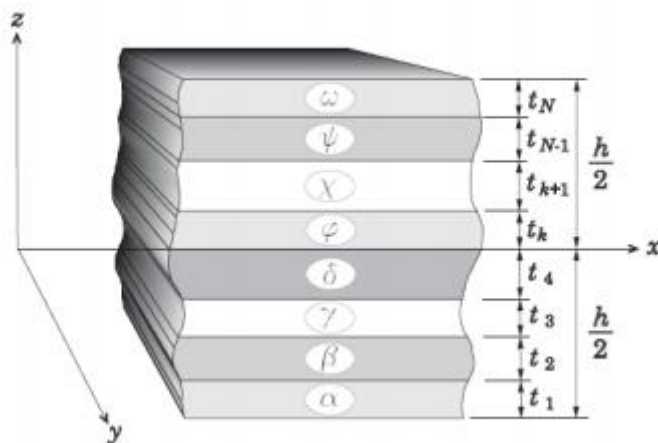


Fig. 2.2 Secuencia de apilamiento de un lamina cualquiera. Biblioteca virtual Universidad de Sevilla. [12]

2.3.4 Teoría de Placas.

Diferentes tipos de estructuras pueden ser estudiadas utilizando la Teoría de Placas, entre ellas tableros de puentes, cimentaciones, cubiertas y compuertas. Todas ellas se caracterizan por tener un espesor mucho menor que las dimensiones en el resto de direcciones.

El análisis lineal de una placa delgada a flexión se rige por los siguientes criterios conocidos como hipótesis de Kirchhoff:

1º) El material es elástico y lineal.

2º) El espesor es mucho más pequeño que las otras dos dimensiones de la placa.

3º) No hay deformación en el plano medio de la placa permaneciendo neutro durante la flexión.

4º) Se asumen pequeñas deformaciones y por tanto la flecha de la placa será pequeña en comparación con el espesor. También serán pequeños los giros del plano medio y se supondrán despreciables frente a la unidad.

5º) Los puntos situados inicialmente en una normal respecto al plano medio de la placa permanecen después de la flexión normales a la superficie media que representa la deformada de dicho plano

6º) La placa es incompresible a lo largo del espesor y las tensiones normales en dirección perpendicular a la placa son despreciables. [13]

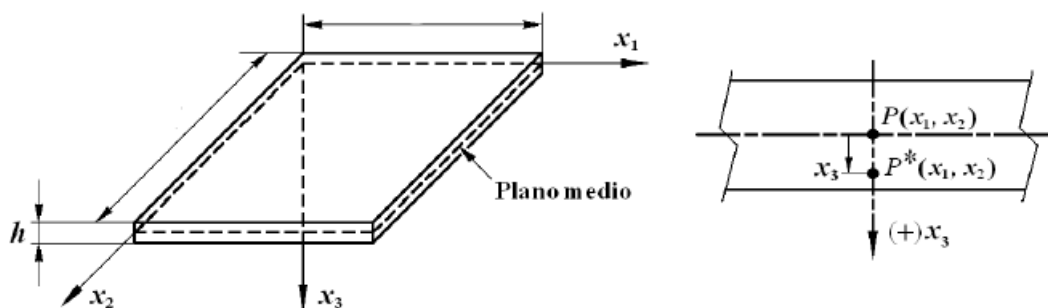


Fig. 2. 3 Coordenadas y plano medio en placa. [14]

En el estudio realizado en la presente memoria se analizan placas delgadas con pequeños desplazamientos en caso lineal y sometidas a flexión.

Si el desplazamiento o flecha máxima w de una placa es pequeña respecto a su espesor h y se tienen en cuenta las hipótesis anteriormente citadas, se puede desarrollar una teoría para la flexión en la que todas las tensiones pueden expresarse en función de la flecha w , que a su vez es función de las coordenadas en el plano de la placa. Esta función satisface una ecuación diferencial lineal que junto con las condiciones de contorno, define por completo w . Esta ecuación ofrece la información necesaria para el cálculo de las tensiones en la placa.

A continuación se muestran los casos particulares de interés para la presente memoria:

-Teoría de placas para flexión en geometría circular.

Para el desarrollo de la teoría de placas en geometría circular ha sido utilizado el documento *Teoría de Placas y Láminas* de Stephen Timoshenko [15] del que cabe destacar el siguiente desarrollo.

Si la carga que actúa sobre una placa circular se encuentra simétricamente distribuida, las flechas serán idénticas en todos los puntos equidistantes del centro. La ecuación diferencial que rige la teoría de placas circulares en flexión simétrica se muestra a continuación:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad (2.1)$$

Para el caso particular de una placa circular de radio a que soporta una carga uniforme de intensidad q , está sometida a un esfuerzo cortante Q a cualquier distancia r del centro:

$$Q = \frac{qr}{2} \quad (2.2)$$

Se obtiene la ecuación diferencial que define el caso particular que se analiza en este proyecto:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{qr}{2D} \quad (2.3)$$

Realizando tres integraciones y siendo C_1 , C_2 y C_3 constantes de integración que se calculan a partir de las condiciones de contorno se obtiene:

$$w = \frac{qr^4}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln \frac{r}{a} + C_3 \quad (2.4)$$

Para el caso que se ha utilizado en este proyecto en el que los bordes están empotrados se calculan las constantes de integración y se obtiene la ecuación final de la flecha:

$$w = \frac{qr^4}{64D} (a^2 - r^2) \quad (2.5)$$

Con el estudio de los momentos flectores se obtiene las ecuaciones de tensiones que se muestran a continuación:

$$\sigma_{r=a} = \frac{3 \cdot q \cdot a^2}{4 \cdot h^2} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{r=0} = \frac{3 \cdot (1 + \nu) \cdot q \cdot a^2}{8 \cdot h^2} \quad (2.7)$$

-Teoría de placas para flexión en geometría rectangular.

En el caso de geometría rectangular, el estudio realizado se ha basado en el manual *Roark's formulas for stress and strain* [16], usando como apoyo el informe *Teoría de Placas* de J. Massa , J. Giro y A. Giudici [14]

Para el caso de comportamiento lineal y pequeños desplazamientos, la integración de la ecuación diferencial y la aplicación de las condiciones de contorno permiten la obtención de la siguiente ecuación que determinan la tensión máxima en la placa donde q es la intensidad de la carga, c medida del lado pequeño de la placa, h el espesor y β un coeficiente que permite diferenciar los cálculos en el centro y borde de la placa:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \beta \cdot q \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^2 \quad (2.8)$$

Coeficiente β para el centro de la placa:

$$\beta_c = \frac{1}{4 \cdot (1 + \alpha^4)} \quad (2.9)$$

Coeficiente β para el borde de la placa:

$$\beta_B = \frac{1}{2 \cdot (1 + \alpha^4)} \quad (2.10)$$

Para el cálculo de este coeficiente es necesaria la utilización del parámetro α , este se calcula con la relación que se muestra a continuación donde c es la medida del lado pequeño de la placa y l la medida del lado grande.

$$\alpha = \frac{c}{l} \quad (2.11)$$

Por otro lado, se puede calcular la flecha máxima que sufre la placa siguiendo la ecuación que se muestra a continuación donde E es el módulo de elasticidad del material y δ un parámetro que se calcula con las relaciones posteriores:

$$\frac{w_{m\acute{a}x}}{h} = \delta \cdot \frac{q}{E} \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^4 \quad (2.12)$$

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\delta_0} \quad (2.13)$$

$$\delta_0 = 32 \cdot (1 + \alpha^2) \quad (2.13)$$

2.3.5 Método de los Elementos Finitos.

El Método de Elementos Finitos es un método de aproximación de problemas continuos de Mecánica de Sólidos. Se trata de una herramienta de cálculo que permite la resolución de infinitos de problemas estructuralistas. Este método ofrece una solución no exacta de tal forma que divide un sólido continuo en un número de partes finitas (elementos). El comportamiento de cada elemento se conocerá mediante los resultados de un número finito de parámetros asociados a puntos característicos conocidos como nodos, que son los puntos que interconectan cada elemento.

De este modo se supondrá que el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nodos del elemento. Por tanto será posible calcular la matriz de rigidez de cada elemento que nos permitirá calcular las tensiones y desplazamientos en el interior de dichos elementos. [17][18]

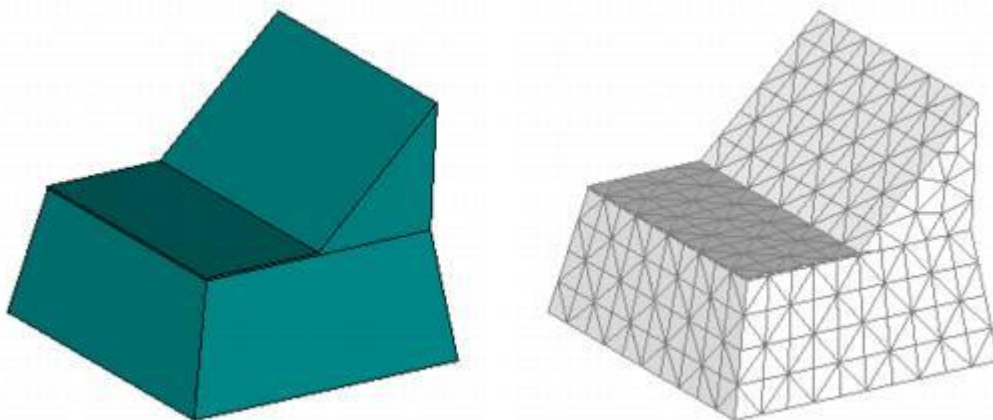


Fig. 2. 4 Sólido mallado. Recuperado de FEMAP [19]

En este proyecto la aplicación del Método de los Elementos Finitos se ha llevado a cabo a partir de la utilización de la herramienta Abaqus. Se trata de un programa de simulación que permite la modelización, cálculo y obtención de resultados de numerosos problemas de Mecánica de Estructuras.

2.3.6 Herramienta Abaqus.

Abaqus es un software de análisis y simulación que utiliza el Método de los Elementos Finitos para la resolución de problemas de sólidos caracterizados por unas propiedades de contorno y sometidos a fuerzas. Cuenta con diferentes herramientas de las cuales las más importantes son:

- Abaqus CAE. Permite modelar, editar, diagnosticar y visualizar los resultados de los análisis requeridos.
- Abaqus/Standar. Ofrece solución para problemas estáticos y dinámicos a baja velocidad en los cuales de localización de la concentración de esfuerzos es crítica.

-Abaqus/Explicit. Simula y resuelve elementos dinámicos o de conducta no lineal.

-Abaqus/ CFD. Aplicación que proporciona solución para problemas de dinámica de fluidos.

-Abaqus/ Electromagnetic. Ofrece la resolución de problemas electromagnéticos computacionales avanzados. [20]

Para el proyecto que se presenta se ha hecho uso del software Abaqus CAE el cual cuenta con diferentes módulos los cuales nos permiten desarrollar y dar solución a diferentes problemas. Los módulos con los que cuenta el programa se muestran a continuación:

Part. El módulo part permite dar forma a la figura sólida o a las partes de la estructura que se pretende estudiar.

Property. Este apartado permite introducir los datos de las propiedades de todos los materiales que vayan a ser necesarios en el estudio para así poder ser asignados a diferentes secciones.

Assembly. Permite ensamblar las diferentes partes creadas de la estructura para así formar un sólido en conjunto que de forma al elemento real que se quiere analizar.

Step. Módulo que permite determinar el tipo de análisis que se va a realizar.

Interaction. Permite crear diferentes tipos de interacciones entre las parts para así simular de la forma más precisa.

Load. Módulo en el que se introducen las condiciones de contorno a las que se sujeta la estructura así como todas las fuerzas que soporta la misma.

Mesh. Creación del mallado. Como se ha explicado anteriormente el método de elementos finitos divide el sólido en elementos interconectados por nodos, lo que se conoce como mallado. El módulo mesh es la herramienta para realizar este paso que será clave para la obtención de resultados.

Optimization. Herramienta de optimización.

Job. Módulo que se encarga de procesar el problema creado. Cada nuevo problema es un nuevo trabajo (Job) que se procesa y compila de tal forma que si no se detecta ningún error, el problema está preparado para la visualización de resultados.

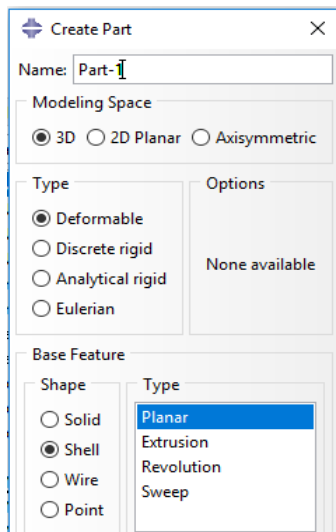
Visualization. Permite visualizar los resultados una vez que el problema ha sido procesado.

Sketch. Módulo que permite obtener perfiles bidimensionales para definir la geometría de cualquiera part o sólido a analizar.

2.3.7 Utilización de Abaqus para el proyecto presente.

El procedimiento seguido para el análisis de cada una de las configuraciones estudiadas ha sido el que se indica a continuación:

Una vez abierto el programa Abaqus/CAE, se ha creado un nuevo fichero. Este nuevo fichero contiene todos los modelos que se presentan en el proyecto. Los módulos que han sido descritos en el apartado anterior se encuentran en el programa en un orden lógico correspondiente a su uso. En primer lugar, se ha hecho uso del módulo Part. Con las herramientas que contiene este módulo se ha dado forma a todas las partes que forman la estructura a estudiar.



Las partes que componen la puerta estudiada son tipo 3D y deformables. Además, como el elemento estudiado es una placa cuyo espesor es considerablemente menor que su longitud, se han creado parts tipo *Shell* y en modo *planar*.

Fig. 2.5 Creación de una part.

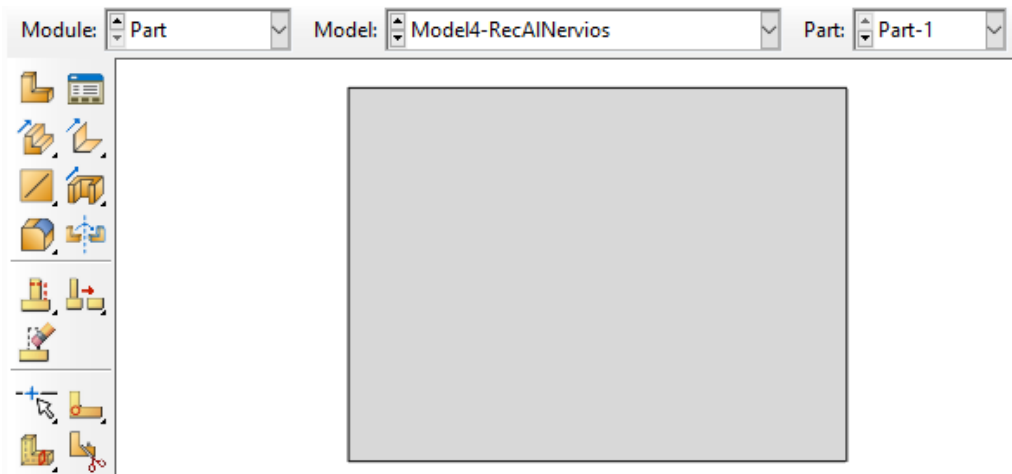


Fig. 2.6 Ejemplo part placa del proyecto.

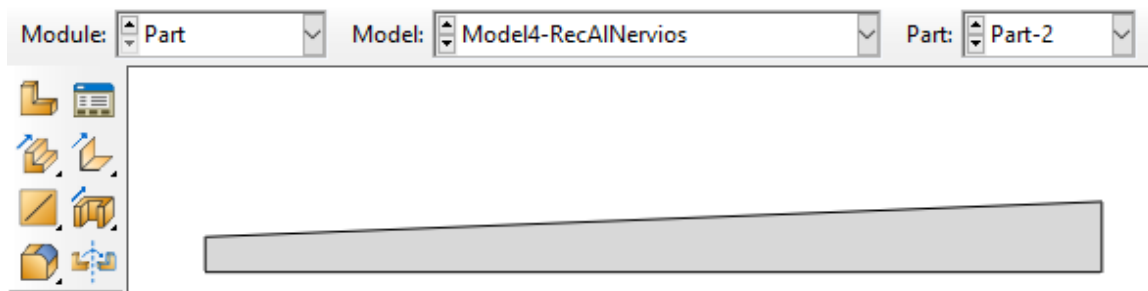


Fig.2.7 Ejemplo part nervio tipo 1 del proyecto.

Una vez que han sido creadas todas las partes que componen el sólido a analizar, se ha pasado al módulo Property. En este módulo han sido creadas y asignadas sus propiedades a los materiales utilizados en el proyecto: Aluminio, Acero, Titanio y Fibra de Carbono.

En caso de los materiales isótropos el proceso ha sido más sencillo puesto que solo ha sido necesario introducir las propiedades mecánicas de cada uno de ellos. Se han introducido los datos del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson en el apartado *Elastic* tipo *Isotropic*.

Por otro lado, para la fibra de carbono, las propiedades han sido introducidas en el apartado *Elastic* tipo *Lámina*, esta modalidad nos ha permitido introducir las propiedades en las diferentes direcciones (E_1 , E_2 , G_{12} , G_{13} , G_{23} y ν_{12}). Además, al tratarse de un material tipo lámina, se ha introducido la orientación de cada lámina, conocido como empaquetamiento del laminado, así como el número de láminas y el espesor de cada una.

Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Layup name:

Basic Advanced

Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

☒ Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
fibracarbono	0.0002	0	3	a
fibracarbono	0.0002	90	3	b
fibracarbono	0.0002	45	3	c
fibracarbono	0.0002	-45	3	d

Fig. 2. 8 Equipamiento del laminado en Abaqus.

A continuación se ha procedido a hacer uso del módulo Assembly, este paso ha sido necesario en las estructuras que han tenido más de una parte, en nuestro proyecto ha sido útil para las configuraciones con nervios. Se ha hecho uso de la herramienta *Create Instance*, que ha permitido seleccionar las partes que van a ser utilizadas, así como las herramientas *Translate Instance* y *Radial Pattern* para colocar en forma radial los nervios a modo de refuerzo. Con el uso de la aplicación *Merge* ha sido posible consolidar la estructura formada por diferentes partes como un sólido único.

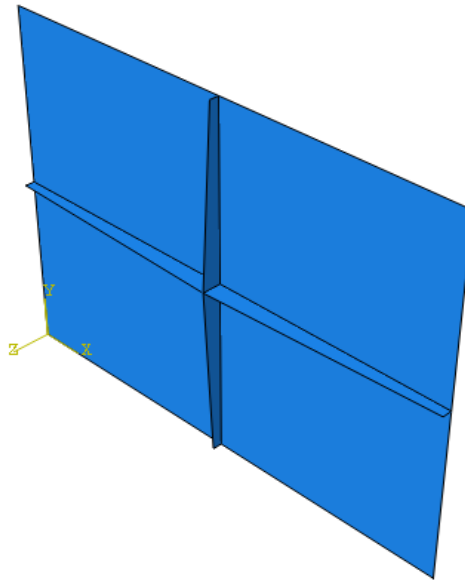


Fig.2.9 Ejemplo part creada una vez realizado el Merge.

Posteriormente se ha realizado el Step, paso obligatorio para la creación del proyecto y ,a continuación, se hubiese hecho uso del módulo Interaction si hubiese sido necesario, ya que es un paso opcional que no necesita ser utilizado en muchos de los problemas estructurales como es este caso.

El módulo Load, que sigue a los anteriormente citados, nos ha permitido introducir las condiciones de contorno y las fuerzas soportadas. En este caso en el que todos los bordes de la placa se encuentran empotrados, se ha aplicado el *encastre* dentro de la categoría de condiciones de contorno mecánicas. Por otro lado, utilizando la herramienta *Create Load* se ha aplicado la fuerza presente en nuestro problema como categoría mecánica tipo presión, puesto que se trata de una carga transversal uniforme.

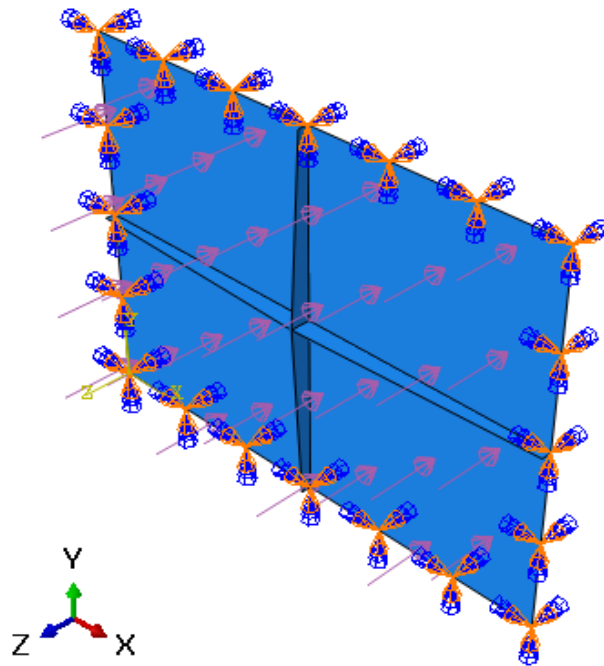


Fig. 2.10 Condiciones de contorno y cargas en Abaqus.

Posteriormente se ha hecho uso del módulo Mesh, un paso indispensable y clave para el problema que se presenta. Se ha realizado el mallado del sólido en cuestión de tal forma que ha quedado dividido en un número finito de elementos para el estudio de su comportamiento.

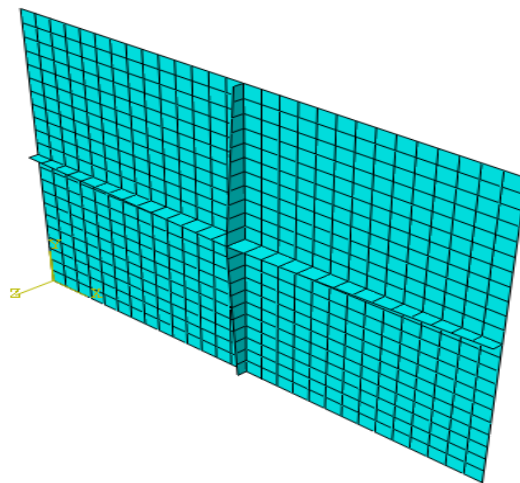


Fig.2.11 Mallado en Abaqus.

En este momento es importante destacar que para el desarrollo del proyecto ha sido utilizada la versión estudiante del programa Abaqus, el cuál limita el número de nodos a 1000. Por tanto, el tamaño del mallado y los resultados obtenidos han resultado influenciados por esa restricción, que da lugar en algunos casos a aproximaciones menos precisas en cuanto a resultados de magnitudes locales.

Una vez realizado el correcto mallado de la estructura estudiada, se ha hecho uso del módulo Job para lanzar y procesar el proyecto y, posteriormente, visualizar los resultados con la herramienta Visualization. Finalmente, se ha obtenido la solución del problema estructural propuesto pudiendo así comprobar las tensiones que soporta y los desplazamientos que se generan.

3. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO.

Para todo proceso de diseño es necesario contar con una idea general inicial de tal modo que se pueda trabajar en base a ella y así los objetivos principales estén presentes de forma sencilla a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

El módulo habitable que se presenta persigue la utilización de los propios recursos disponibles en Marte así como el aprovechamiento de su superficie rocosa. Debido a las condiciones meteorológicas de Marte, uno de los principales objetivos ha sido diseñar una estructura que soporte los cambios de temperatura, más extremos que en el planeta Tierra, así como los fuertes vientos y tormentas que se originan frecuentemente. A su vez, otro factor importante a tener en cuenta para la vida en Marte es la elevada radiación solar que llega a su superficie. De tal forma que, proteger a los astronautas de esta radiación también será un objetivo a considerar.

Con el fin de evitar estos factores y proteger a los tripulantes de estas condiciones se ha desarrollado el proyecto partiendo de una idea inicial principal que se basa en desarrollar un espacio habitable que se encuentre excavado bajo la superficie del planeta. Se trata de un espacio en el que podrá convivir un grupo de tripulantes durante un tiempo prolongado.

Una parte importante del habitáculo estudiado ha sido la parte de acceso, esta cuenta con un túnel de entrada que sirve como vía para llegar a las dependencias desde la superficie marciana.

Esta zona se ha diseñado de tal modo que tiene dos puertas dispuestas de tal forma que permiten la movilidad tanto de personas como de robots, herramientas o maquinaria necesaria para la construcción y el desarrollo de la vida en el interior. El objetivo de estas puertas es conseguir el correcto aislamiento del recinto de tal forma que se conserven en el interior la presión y condiciones creadas de forma artificial para el transcurso de la vida humana.

Para estructurar la zona de entrada y el módulo en general, cabe diferenciar tres zonas con distintas características así como el uso de cada una de ellas:

-Exterior o intemperie: forma parte de esta zona todo lo que se encuentra fuera de la puerta 1 o puerta exterior. Los tripulantes necesitarán hacer uso del traje espacial cuando crucen esta puerta para así poder hacer frente a la atmósfera y condiciones de Marte.

-Zona intermedia: se trata de la parte media del túnel de entrada establecida entre la puerta exterior y la interior. Esta es una zona de tránsito con unas dimensiones mucho menores que la parte habitable, de este modo, la presurización y acondicionamiento se realiza de forma rápida cada vez que un tripulante entre o salga. Cabe destacar la finalidad de esta zona de paso. Esta zona se encuentra entre dos puertas de tal modo que permite mantener la zona habitable sin riesgos de pérdida de presión. Su objetivo y

funcionamiento es el siguiente: cuando se abra la puerta exterior, esta zona intermedia pierde presión. Una vez que la puerta exterior sea cerrada y el tripulante haya entrado, se vuelve a conseguir la presión necesaria en un corto intervalo de tiempo. Cuando la zona intermedia esté perfectamente condicionada es posible abrir la puerta interior, de acceso directo a las dependencias, sin riesgos para los tripulantes que se encuentren en ellas. De este modo, esta zona está destinada a guardar los trajes y equipamiento espacial y es la zona en la que los astronautas pueden prepararse y equiparse en el momento de salida al exterior.

-Zona interior: parte que se encuentra al otro lado de la puerta 2 o puerta interior. En esta zona se encuentran las dependencias de las que pueden hacer uso los tripulantes. El uso del traje espacial no es necesario en esta zona puesto que en todo momento se encontrará condicionada y habilitada para la presencia del ser humano.

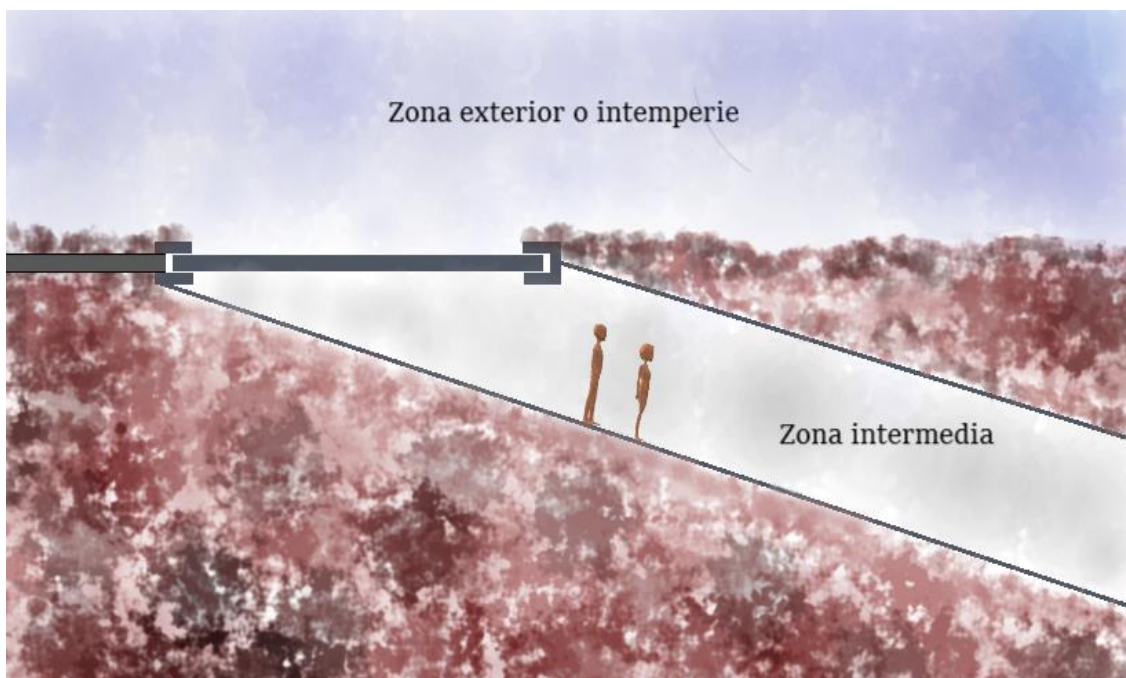


Fig.3.1 Zona exterior y zona intermedia.

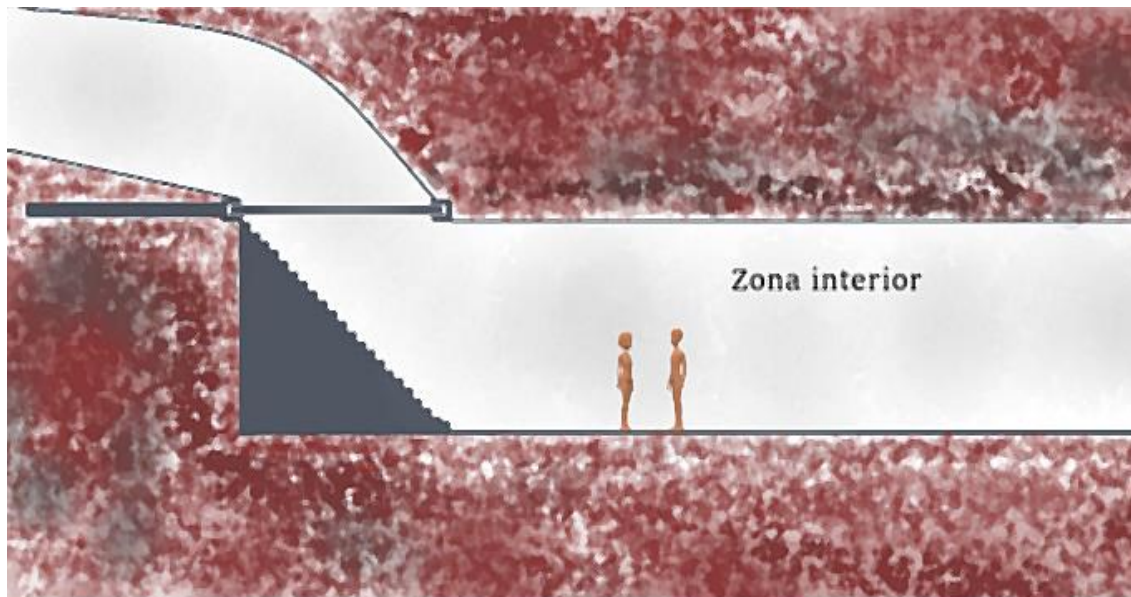


Fig.3. 2 Zona interior.

Las puertas que conforman la entrada se encuentran dispuestas de tal modo que el procedimiento para el acceso al habitáculo conlleve el siguiente proceso:

1. Apertura de la puerta exterior.
2. Paso del tripulante a la zona intermedia.
3. Cierre de la puerta exterior.
4. Presurización zona intermedia.
5. Apertura de la puerta interior.
6. Paso del tripulante a las dependencias.
7. Cierre de la puerta interior.

El mecanismo de salida se realizará del mismo modo llevando a cabo el proceso de forma inversa.

Por otro lado, a la hora de plantear un habitáculo en el que pueda convivir un grupo de tripulantes, es importante tener en cuenta que estos deben disponer del espacio necesario para contar con el bienestar y holgura para una estancia prolongada.

La superficie ha sido dividida en zonas estructuradas de tal forma que se puedan desarrollar actividades tanto cotidianas como específicas para el transcurso de la vida de los astronautas. Por otro lado, el proceso de investigación durante la estancia ha hecho necesario contar con espacios habilitados y destinados a la exploración, experimentación y estudio del planeta. Las dependencias con las que ha de contar el habitáculo son las siguientes:

- Zonas de descanso.
- Zonas comunes para recreación.
- Aseos.
- Cocina.
- Laboratorio.
- Zona de control y mando.
- Almacén de recursos.
- Zona intermedia/Vestíbulo y almacenaje de trajes espaciales.

El aprovechamiento del espacio pretende ser llevado a cabo de la forma más óptima posible ya que, a pesar de que el margen de ampliar la superficie excavada es amplio, es importante economizarlo para así ahorrar en otros factores como materiales o esfuerzo y dinero en acondicionar el emplazamiento.

4. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA.

4.1 Descripción del problema.

El proyecto se ha enfocado en diseñar la solución más óptima de forma de acceso al habitáculo. Para el diseño de la entrada ha sido necesario tener en cuenta numerosos factores y analizar diferentes posibilidades y escenarios.

El problema se ha basado en el objetivo principal de dimensionar el espesor y geometría de las puertas de acceso teniendo en cuenta que deben cumplir los criterios necesarios para que sea una solución factible, teniendo como propósitos principales conseguir el menor peso y menores desplazamientos posibles en la placa. Para ello se han estudiado diferentes configuraciones tanto de forma analítica como por el Método de Elementos Finitos. Se ha comenzado por el dimensionamiento de la placa con geometría circular haciendo uso de diferentes materiales y, posteriormente, se ha realizado el mismo proceso para geometría rectangular.

En último lugar, para ambos casos, se ha llevado a cabo un estudio de posibles mejoras añadiendo refuerzos en forma de nervios a cada caso inicial seleccionado. De este modo, ha sido posible la elección del material más adecuado para las prestaciones requeridas así como el análisis de la influencia de la utilización de nervios, la comprobación de la mejora de resultados y la selección del tipo de nervios más ventajosos.

La entrada es un túnel que cuenta con dos puertas en posición horizontal y con geometría a determinar. Como el espesor es considerablemente menor que el área de las puertas, estas han sido tratadas como placas de tal forma que ha sido posible el uso de la Teoría de placas para su análisis. Por tanto, como punto de partida, tendremos una placa con una geometría determinada, sometida a diferentes cargas.

Las cargas soportadas por la placa se muestran a continuación:

-Peso de la placa.

$$\text{Peso} = m \cdot g_{\text{marte}} = V \cdot \rho \cdot g_{\text{marte}} = (S \cdot h) \cdot \rho \cdot g_{\text{marte}} \quad (4.1)$$

-Presión interior (Presión atmosférica terrestre).

$$P_{\text{atmT}} = 10^5 \text{ Pa}$$

-Presión exterior (Presión atmosférica en Marte).

$$P_{\text{atmM}} = 30 \text{ Pa}$$

Cabe destacar que, debido a que la gravedad de Marte es muy pequeña ($g_{\text{Marte}}=3,71\text{m/s}^2$), el peso de la placa ha sido despreciado respecto a la presión interna creada de 10^5 Pa .

Del mismo modo, la presión atmosférica en la superficie de Marte es de un orden mucho menor que la terrestre creada en el interior y, por tanto, es también despreciable para el estudio del dimensionamiento de la placa. De este modo, tendremos una placa sometida a una presión uniforme sobre toda su superficie.

Por otro lado, la placa está sometida a la presión cuando se encuentra cerrada, de tal modo que, en este momento, el desplazamiento y rotación en el borde de la placa están impedidos en todas las direcciones. Por tanto, para el estudio se ha tomado la puerta como una placa empotrada en todo su perímetro y sometida a una presión uniforme.

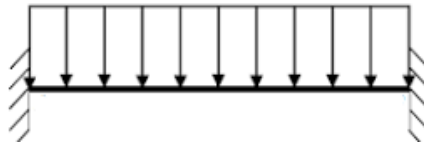


Fig. 4. 1 esquema de la placa empotrada y sometida a presión uniforme.

La placa, cuando está cerrada, cuenta con un encastre en todo su perímetro que posibilita su perfecta sujeción. Además, en su diseño cuenta con un margen en dirección horizontal, como se muestra en la Fig.4.2, que evita que se creen tensiones en dirección longitudinal debido a las posibles dilataciones por causa de los cambios de temperatura que se dan en el exterior.



Fig. 4. 2 Esquema de la sujeción de la puerta en posición cerrada.

Para asegurar una buena accesibilidad al módulo teniendo en cuenta las dimensiones de los trajes espaciales así como el posible acceso de maquinaria y equipamiento, se ha partido del dimensionamiento del espesor de la placa empezando por dos geometrías principales, caso circular y caso rectangular

Para los cálculos, las propiedades y materiales utilizados han sido los que se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

-Materiales isotrópos.

TABLA 4.1 PROPIEDADES DE MATERIALES ISÓTROPOS.

Propiedades	Acero AISE 4060 Steel (UNS 640630)	Aluminio 7075-T6; 7075-T651	Titanio Ti ₆ Al ₄ V Typical
Densidad [g/cm ³]	7,75	2,81	4,42
Límite Elástico σ_y [MPa]	1593	503	950
Módulo de elasticidad E [GPa]	201	71,7	120
Módulo de Poisson ν	0,3	0,33	0,34

Fuente: MatWeb: Online Materials Information Resource. [21]

-Material compuesto.

TABLA 4.2 PROPIEDADES DE LA FIBRA DE CARBONO.

Propiedades	Carbon/Epoxy AS4/3501-6
Densidad [g/cm ³]	1,38
Modulo longitudinal E_1 [GPa]	142
Módulo de elasticidad E_2 [GPa]	10,3
Módulo de Poisson ν_{12}	0,34
Tensión límite longitudinal a tracción X_T [MPa]	1830
Tensión límite longitudinal compresión, X_C [MPa]	1096
Tensión límite transversal a tracción, Y_T [MPa]	57
Tensión límite transversal a compresión, Y_C [MPa]	228
Tensión límite de cortadura, S [MPa]	71

Fuente: Introduction to Composite Materials Design. Ever J Barbero. [22]

4.2 Casos estudiados.

En el proceso de diseño se ha llevado a cabo el análisis de los resultados de numerosos casos, esto ha permitido descartar opciones poco ventajosas y seleccionar las que han ofrecido mejores resultados para así poder llegar a un resultado final óptimo. En el problema presentado se han estudiado las configuraciones que se muestran a continuación:

- Caso 1. Placa circular de Aluminio.
- Caso 2. Placa circular de Acero.
- Caso 3. Placa circular de Titanio.
- Caso 4. Placa circular de fibra de Carbono.
- Caso 5. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 1.
- Caso 6. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 2.
- Caso 7. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 3.
- Caso 8. Placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2.
- Caso 9. Placa rectangular de Aluminio.
- Caso 10. Placa rectangular de Acero.
- Caso 11. Placa rectangular de Titanio.
- Caso 12. Placa rectangular de fibra de Carbono.
- Caso 13. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 1.
- Caso 14. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 2.
- Caso 15. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 3.
- Caso 16. Placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2.

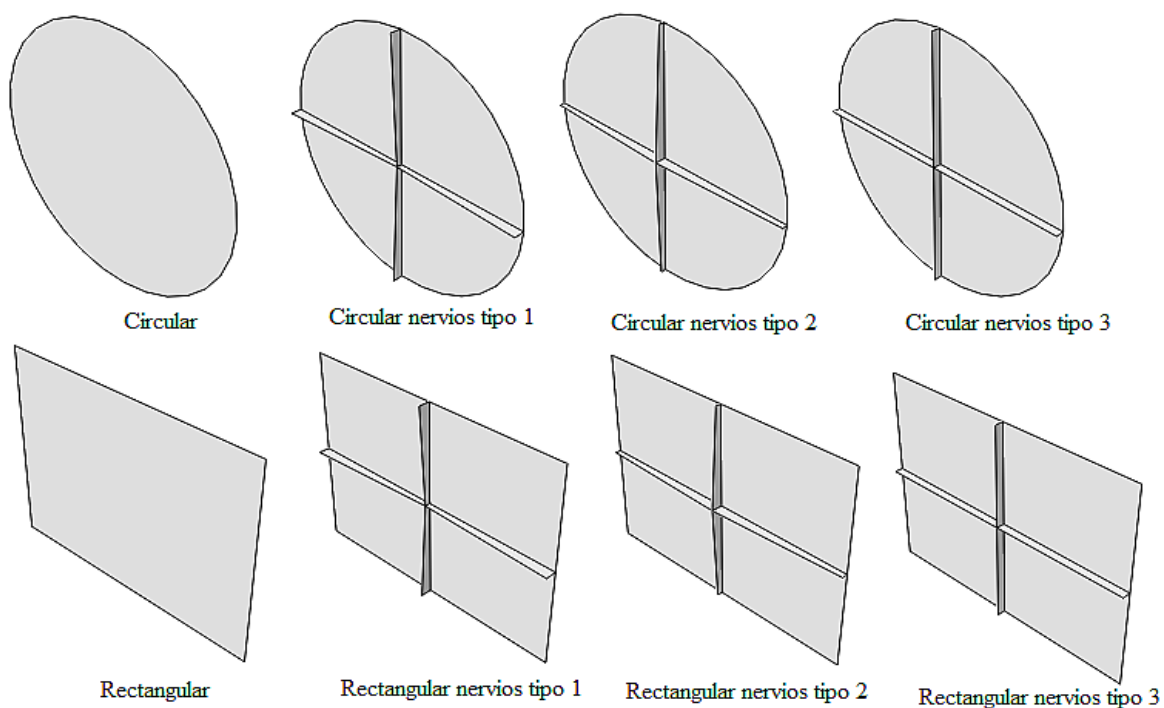


Fig. 4.3 Diseños estudiados.

A continuación se muestran las dimensiones que han sido seleccionadas de cada tipo de placa. Estas medidas han sido utilizadas en todas las variantes de las diferentes configuraciones y han permitido dimensionar el espesor de cada una de ellas con los diferentes métodos utilizados. Para el diseño circular se ha partido de una placa de diámetro igual a 2 metros y para el diseño rectangular se ha optado por una placa de 2 x 1,5 m.

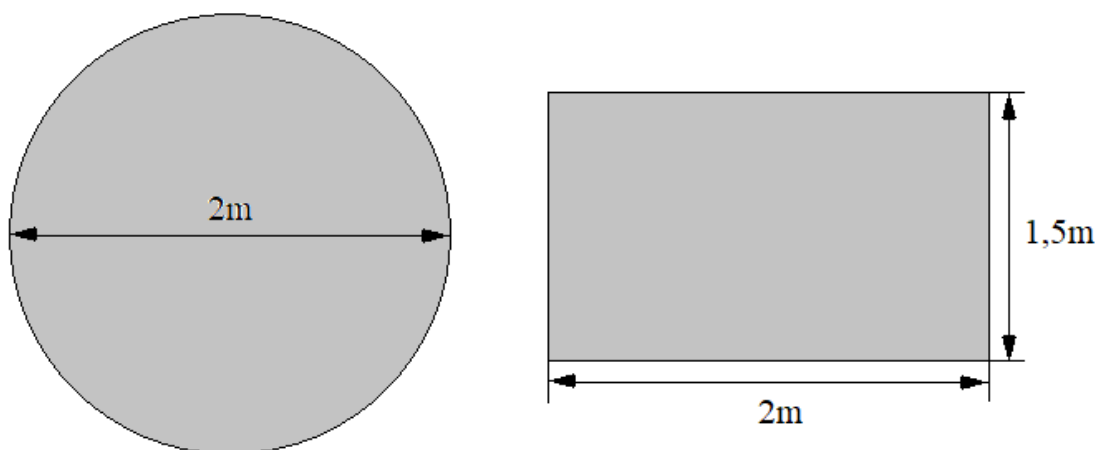


Fig. 4.4 Dimensiones de los diseños estudiados.

4.3 Métodos utilizados.

El proceso de diseño que ha sido llevado a cabo reúne diferentes escenarios estructurales y materiales. Las diferentes geometrías y tipos de materiales utilizados han hecho necesario el uso de diferentes métodos para el análisis de cada caso.

En primer lugar, se ha optado por dimensionar el espesor de la placa de forma analítica, haciendo uso de la Teoría de Placas. Esta teoría requiere estudios diferentes para geometría circular y rectangular, el proceso analítico para ambos casos ha sido recogido de los libros *Teoría de Placas y Láminas* de Stephen P. Timoshenko [15] y del manual *Roark's Formulas for Stress and Strain* de Warren C. Young [16] respectivamente.

Por otro lado, además del método analítico como primer estudio, se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos. Este sistema ha sido implementado por la herramienta Abaqus, la cual ha permitido el estudio de materiales compuestos y de configuraciones con nervios que resultan ser más complejas.

A continuación se presentan los métodos con los que han sido analizados cada caso:

- Caso 1. Placa circular de Aluminio. Estudiado con proceso analítico (Teoría de Placas de Timoshenko) y con Método de Elementos Finitos.
- Caso 2. Placa circular de Acero. Estudiado con proceso analítico (Teoría de Placas de Timoshenko)
- Caso 3. Placa circular de Titanio. Estudiado con proceso analítico (Teoría de Placas de Timoshenko)
- Caso 4. Placa circular de fibra de Carbono. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 5. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 1. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 6. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 2. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 7. Placa circular de Aluminio con nervios tipo 3. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 8. Placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 9. Placa rectangular de Aluminio. Estudiado con proceso analítico (Teoría de Placas, manual Roark's) y con Método de Elementos Finitos.
- Caso 10. Placa rectangular de Acero. Estudiado con proceso analítico (Teoría de

Placas, manual Roark's).

- Caso 11. Placa rectangular de Titanio. Estudiado con proceso analítico (Teoría de Placas, manual Roark's).
- Caso 12. Placa rectangular de fibra de Carbono. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 13. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 1. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 14. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 2. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 15. Placa rectangular de Aluminio con nervios tipo 3. Estudiado con Método de Elementos Finitos.
- Caso 16. Placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2. Estudiado con Método de Elementos Finitos.

4.4 Criterios para el dimensionamiento.

Para poder llevar a cabo el desarrollo del estudio, hacer uso de ecuaciones y dimensionar la placa, ha sido necesario establecer los criterios en base a los cuales se van a obtener los resultados.

- Criterio 1.

El primer criterio que se ha utilizado como punto de partida ha sido el criterio de tensión máxima. Este establece que la tensión máxima soportada por la placa no puede superar la tensión de límite elástico del material haciendo uso de un coeficiente de seguridad $n=3$. Por tanto, la siguiente ecuación debe cumplirse en todo momento:

$$\sigma_{\text{máx}} < \sigma_y/3 \quad 4.2$$

- Criterio 2.

Este criterio persigue la minimización del peso de la placa. Las diferentes geometrías y materiales han proporcionado a la placa diferentes valores de masa, la cual ha variado según la configuración. Las soluciones menos pesadas han sido consideradas más ventajosas puesto que la ligereza es un punto clave para los viajes espaciales. Por tanto, se impondrá en segundo lugar el criterio de mínimo peso que ha hecho posible descartar las opciones más pesadas.

- Criterio 3.

Por último, con el objetivo de cumplir con el compromiso de seguridad y confort requeridos, se ha impuesto un criterio de máximo desplazamiento. El desplazamiento máximo admisible ha sido de 10mm. Cabe destacar que no existe ninguna norma que regule este criterio, pero ha sido aplicado este dato como dato de referencia debido a dos motivos: en primer lugar, si los desplazamientos se superaran dejaría de cumplirse la hipótesis de pequeños desplazamientos de la elasticidad lineal y, por otro lado, es importante destacar que desplazamientos mayores a 10mm en la placa que constituye la puerta podrían dar sensación de poca seguridad a los tripulantes de la misión así como crear defectos o problemas futuros en la placa.

5. FASES DE DISEÑO.

A continuación se muestra el proceso de diseño llevado a cabo para llegar a la solución más óptima de las puertas de entrada del proyecto que se presenta.

El proceso de diseño se ha basado en la obtención de los resultados que proporcionan las diferentes configuraciones de la puerta de entrada para así conseguir seleccionar la opción más óptima.

En primer lugar, se ha analizado la posibilidad de crear una entrada circular llevando a cabo un estudio analítico basado en la teoría de Láminas y Placas de Stephen Timoshenko[15], el cual nos ha permitido comprobar la validez del Método de Elementos Finitos (MEF). Este Método ha sido utilizado en fases posteriores para el dimensionamiento de la placa con materiales compuestos y el estudio del uso de refuerzos.

Como punto de partida se ha optado por el estudio de una entrada de geometría circular formada por diferentes materiales isótropos:

- Aluminio 7075-T6; 7075-T651
- Acero AISE 4060 Steel (UNS 640630)
- Titanio Ti₆Al₄V Typical

Con el método analítico se ha calculado el espesor de la placa necesario para que se cumpla el criterio de las tensiones con el objetivo de encontrar el material que nos permita la solución más ligera. A continuación, se ha procedido al estudio de la posibilidad de utilizar un material compuesto como es la fibra de carbono con el objetivo de reducir el peso de la placa y, a su vez, mejorar las prestaciones de la misma.

Tras comprobar el funcionamiento y las ventajas y desventajas de cada material, se ha optado por reforzar la placa en cuestión añadiéndola una serie de nervios dispuestos de forma radial. El objetivo de la última fase se ha basado en analizar diferentes tipos de nervios para así compararlos y seleccionar las opciones que permitan reducir más los desplazamientos.

Este procedimiento realizado para una geometría circular ha sido posteriormente aplicado utilizando una geometría rectangular para así determinar cuál es la mejor opción. En este caso, el dimensionamiento se ha llevado a cabo, en primer lugar, haciendo un estudio de forma analítica basado en el manual “Roark's Formulas for Stress and Strain”[16] y, a continuación, después de ser validado, se ha continuado con el estudio haciendo uso del Método de Elementos Finitos. Este método ha permitido estudiar para geometría rectangular los casos de materiales isótropos, material compuesto y las diferentes variantes de refuerzos en forma de nervios.

5.1 Placa circular.

5.1.1 Placa circular. Materiales isótropos.

En primer lugar se ha realizado la primera simplificación: estudio de una placa circular de 2m de diámetro, empotrada y sometida a una presión uniforme. El objetivo ha sido calcular el espesor necesario para cada caso haciendo uso del criterio 1 o criterio de máxima tensión y, posteriormente, descartar los materiales que produzcan mayor masa utilizando el criterio 2. De este modo, se consigue una primera posible solución para el proyecto en cuestión.

Por otro lado, cabe destacar que, haciendo uso de la Teoría de Placas recogida por Timoshenko en su libro 'Teoría de Láminas y Placas', ha sido posible realizar la primera comprobación de factibilidad de los resultados del Método de Elementos Finitos. Estos resultados han sido comparados con las soluciones analíticas halladas con las relaciones recopiladas del libro citado.

Se ha calculado el espesor para diferentes casos:

-Tensión máxima en el borde de la placa. ($\sigma_{r=a}$)

-Tensión máxima en el centro de la placa. ($\sigma_{r=0}$)

Como establece el primer criterio tomado, se pretende que el material trabaje de forma elástica, sin llegar a deformaciones plásticas. Por tanto, el dato de límite elástico (σ_y) ha sido utilizado como tensión máxima admisible, teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad $n=3$, por tanto se ha obtenido la relación:

$$\sigma < \sigma_y/3 \quad (5.1)$$

El libro 'Teoría de Láminas y Placas' de Timoshenko[15] reúne el análisis de múltiples casos de los cuales se han extraído las relaciones necesarias para este estudio. Nos centraremos por tanto en el apartado del libro ecuaciones para el dimensionamiento de placas circulares con bordes empotrados y sometidas a carga transversal uniforme. [18]

-Caso1. Tensión en el borde de la placa.

$$\sigma_{r=a} = \frac{3 \cdot q \cdot a^2}{4 \cdot h^2} \quad (5.2)$$

Despejando el espesor y para $\sigma_{r=a} < \sigma_y/3$:

$$h > \sqrt{\frac{3 \cdot q \cdot a^2}{4 \cdot \frac{\sigma_y}{3}}} \quad (5.3)$$

-Caso 2. Tensión en el centro de la placa.

$$\sigma_{r=0} = \frac{3 \cdot (1 + \nu) \cdot q \cdot a^2}{8 \cdot h^2} \quad (5.4)$$

Despejando el espesor h y para $\sigma_{r=0} < \sigma_y/3$:

$$h > \sqrt{\frac{3 \cdot (1 + \nu) \cdot q \cdot a^2}{8 \cdot \frac{\sigma_y}{3}}} \quad (5.5)$$

A continuación se ha realizado el análisis para el acero y, posteriormente, se han calculado los resultados para el resto de materiales, dichos resultados han sido obtenidos con los mismos criterios y haciendo uso de los mismos pasos.

Realizando estos cálculos haciendo uso de las propiedades del Acero se ha obtenido:

- Caso 1. Tensión en borde de la placa.

$$\sigma_{r=a} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 1^2}{4 \cdot h^2} \quad (5.6)$$

$$\sigma_{r=a} < 1593 \cdot 10^6 / 3 \quad (5.7)$$

Por tanto:

$$h > \sqrt{\frac{3 \cdot 10^5 \cdot 1^2}{4 \cdot \frac{1593 \cdot 10^6}{3}}} \quad (5.8)$$

$$h > 0,01188m$$

- Caso 2. Tensión en centro de la placa.

$$\sigma_{r=0} = \frac{3 \cdot (1 + 0,3) \cdot 10^5 \cdot 1^2}{8 \cdot h^2} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{r=0} < 1593 \cdot 10^6 / 3 \quad (5.10)$$

Por tanto:

$$h > \sqrt{\frac{3 \cdot (1 + 0,3) \cdot 10^5 \cdot 1^2}{8 \cdot \frac{1593 \cdot 10^6}{3}}} \quad (5.11)$$

$$h > 0,00958m$$

Con los mismos criterios y fórmulas se ha dimensionado la placa para el resto de materiales objeto de estudio de tal forma que se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 5.1.

TABLA 5.1 ESPESOR DE PLACA CIRCULAR CON MATERIALES ISÓTROPAS.

Casos	Espesor Acero [mm]	Espesor Aluminio [mm]	Espesor Titanio [mm]
$\sigma_r = a$	$h > 11,88$	$h > 21,1$	$h > 15,38$
$\sigma_r = 0$	$h > 9,58$	$h > 17,2$	$h > 12,5$
Máximo redondeado	$h = 12$	$h = 22$	$h = 16$

Para optimizar el dimensionamiento de la placa, el resultado a escoger en esta primera aproximación siguiendo el criterio 2, ha sido la solución que ha proporcionado la menor masa. A continuación se muestran los cálculos que han sido realizados para hallar la masa de la placa en cada caso:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot (h \cdot S) \quad (5.12)$$

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (5.13)$$

TABLA 5.2 MASA DE PLACA CIRCULAR CON MATERIALES ISÓTROPAS.

Material	Acero	Aluminio	Titanio
Masa placa [kg]	292,168	194,213	222,17

Podemos, por tanto, concluir que la opción que mejor ha cumplido los requisitos y la más ligera es la utilización de Aluminio como material principal. La selección de este material en este momento del proceso de diseño ha permitido descartar el Titanio y el Acero como posibles materiales para otras configuraciones en la geometría circular.

- Comparación de resultados analíticos con el Método de Elementos Finitos.

Con el fin de validar el Método de Elementos Finitos, se muestran a continuación los resultados y el margen de variación respecto a tensiones y desplazamientos que han sido obtenidos de tal modo se ha podido asegurar que las conclusiones futuras son aceptables.

Partiendo de los datos conseguidos en el apartado anterior, han sido comprobados los resultados para una placa de Aluminio con un espesor de 22mm utilizando dos criterios: Flecha máxima y tensiones máximas.

-Flecha máxima ($w_{m\acute{a}x}$).

En primer lugar se ha comparado la flecha o desplazamiento máximo. Este primer criterio hace referencia a una magnitud global, por tanto se han esperado unos resultados muy próximos para ambos métodos.

El cálculo de la flecha de forma analítica se ha realizado utilizando la ecuación de flecha máxima recogido por Timoshenko en su libro 'Teoría de Láminas y Placas':

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{q \cdot a^4}{64 \cdot D} \quad (5.14)$$

Siendo la rigidez:

$$D = E \cdot \frac{h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (5.15)$$

Por tanto, para un espesor de 22mm y utilizando las propiedades del Aluminio:

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{10^5 \cdot 1^4}{64 \cdot D} \quad (5.16)$$

$$D = 71,7 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,022^3}{12 \cdot (1 - 0,33^2)} \quad (5.17)$$

Se ha obtenido una flecha máxima $w_{m\acute{a}x} = 0,0218\text{m}$

Por otro lado, observando la solución con el Método de Elementos Finitos se ha comprobado que el desplazamiento máximo es de 0,0219m, lo que supone una variación mínima válida y dentro de lo esperado.

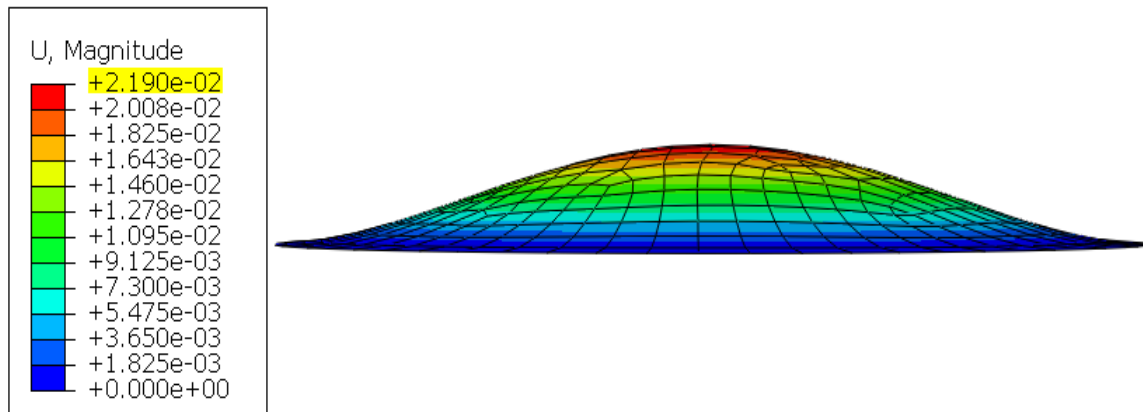


Fig. 5. 1 Desplazamientos en placa circular de Aluminio [m].

-Tensión máxima.

Por otro lado, partiendo de que la tensión máxima se da en el borde de la placa y haciendo uso de la ecuación 5.7, la tensión que se ha obtenido de forma analítica ha tomado un valor de 154,9 Mpa.

Al comprobar los resultados para el Método de Elementos Finitos se ha obtenido:

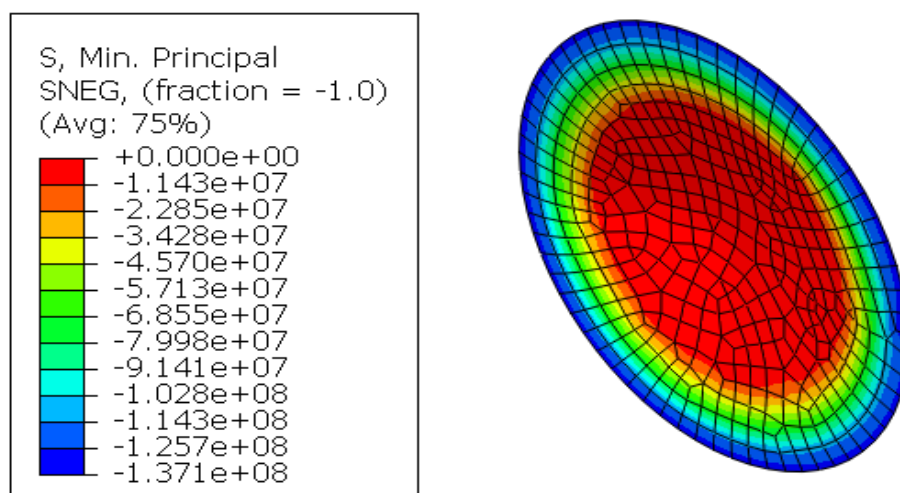


Fig.5.2 Tensión en placa circular de Aluminio. [Pa]

Se ha podido observar que la tensión en el borde según el Método de Elementos Finitos ha resultado ser de 137,1 MPa en magnitud, lo que supone un 11,5% de variación respecto al resultado analítico.

En cuanto a las tensiones, cabe destacar que se trata de un criterio basado en una magnitud local, esta es la causa de la variación en resultados. El programa de elementos finitos utilizado tiene una restricción de mallado de 1000 nodos, debido a que es una versión estudiante. Por tanto, las soluciones de las tensiones locales de cada punto son aproximaciones a la realidad que resultarían más precisas en el caso de utilizar un programa sin esta restricción nodal, herramienta que no está al alcance de los alumnos.

Observando los resultados se ha podido corroborar la validez del método de elementos finitos que ha sido utilizado en dimensionamientos posteriores.

5.1.2 Placa circular. Materiales Compuestos.

El estudio de estructuras con materiales compuestos es un proceso más complejo. En este caso, las ecuaciones que han sido utilizadas para el estudio analítico del apartado anterior no han sido aplicables debido a que el material tiene unas características anisótropas.

En este apartado se ha realizado el estudio de una placa circular empotrada compuesta por láminas de fibra de carbono reforzadas con resina epoxi y sometida a una presión uniforme. La herramienta que ha sido implementada para el dimensionamiento de la placa utilizando el Método de Elementos Finitos ha sido Abaqus. Este programa nos ha permitido añadir láminas de forma progresiva de tal manera que ha sido posible ir comprobando la variación de tensiones soportadas por el laminado y, de este modo, verificar que no supera la tensión máxima admisible por el material.

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

Debido a que los laminados se conforman por el apilamiento de láminas unidireccionales adheridas entre sí, el espesor de la placa se compondrá de un número determinado de capas. Este número se determinará por aproximación progresiva añadiendo el menor número de láminas posible de tal modo que la tensión máxima no supere el criterio establecido.

El criterio que ha sido utilizado implica que no se superen las tensiones de límite elástico guardando el coeficiente de seguridad $n=3$. Al tratarse de un material compuesto las tensiones varían según la dirección, por tanto, en este caso, el criterio 1 de tensión máxima ha sido dividido en 5 ecuaciones que han de cumplirse de la siguiente forma:

$$S_{11_T} < X_T/3 \quad (5.18)$$

$$S_{11_C} < X_C/3 \quad (5.19)$$

$$S_{22_T} < Y_T/3 \quad (5.20)$$

$$S_{22_C} < Y_C/3 \quad (5.21)$$

$$S_{12} < S/3 \quad (5.22)$$

En este caso, cabe destacar que cada lámina sufre un nivel de tensión distinto, puesto que se trata de una geometría circular, esta tensión ha resultado ser mayor en las láminas exteriores y se ha podido observar como su valor disminuye gradualmente a medida que las láminas son más internas. Por esta razón han sido comparadas las tensiones límite con los resultados de las capas más superficiales.

El apilamiento utilizado para el laminado simétrico ha sido $[0/90/45/-45]_s$ siendo el espesor de cada lámina $e=0,2\text{mm}$. De este modo hemos podido hallar el espesor mínimo de la placa de tal modo que cumpla con los criterios establecidos.

Una vez que ha sido realizado el proceso de añadir láminas de forma progresiva de tal modo que se cumplan las ecuaciones descritas anteriormente, cuando la disposición ha llegado a 13 repeticiones del apilamiento simétrico A-B-C-D, se ha obtenido la siguiente disposición del laminado:

☒ Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
fibracarbono	0.0002	0	3	A
fibracarbono	0.0002	90	3	B
fibracarbono	0.0002	45	3	C
fibracarbono	0.0002	-45	3	D
•				
•				
•				
fibracarbono	0.0002	0	3	a13
fibracarbono	0.0002	90	3	b13
fibracarbono	0.0002	45	3	c13
fibracarbono	0.0002	-45	3	d13

Fig. 5.3 Esquema del apilamiento del laminado con 13 repeticiones.

Con esta disposición se ha conseguido que los límites tensionales no se superen. A continuación, en la tabla 5.3. se muestra la recopilación de resultados de las tensiones longitudinales y transversales a tracción y compresión de las 4 láminas exteriores.

TABLA 5.3 TENSIONES PLACA CIRCULAR CON MATERIALES COMPUESTOS.

LÁMINA	S11 Tracción/Compresión [MPa]	S22 [Tracción/Compresión [MPa]	S12 Tracción/Compresión [MPa]
A (0°)	<u>201 / -344</u>	<u>18 / -25</u>	<u>18 /-18</u>
B (90°)	197,2 / -340,2	17,8 / -24,2	17,9 / -17,9
C (45°)	192,5 / 335	17,5 / -23,7	17,5 / -17,5
D (-45°)	190 / -324	17 / -23,5	17,2 / -17,2

De este modo, hemos podido comprobar que las tensiones van disminuyendo hacia el interior y, por tanto, las que nos han interesado han sido las que aparecen en la lámina más superficial, lámina A. En la tabla 5.3 se pueden ver resaltados los valores máximos que se alcanzan, estos han sido los que han delimitado el espesor de la placa y han servido como criterio para establecer si es necesario o no un mayor espesor.

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se pueden observar las tensiones que se producen en la lámina A en las diferentes direcciones.

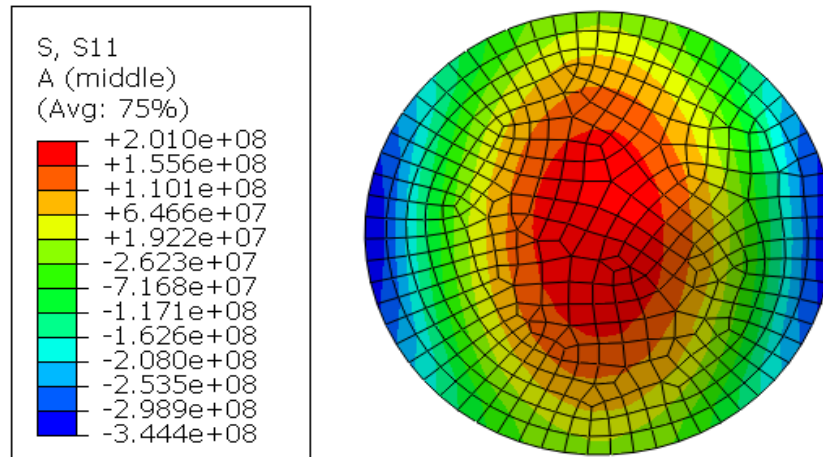


Fig. 5. 4 Tensión S11 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].

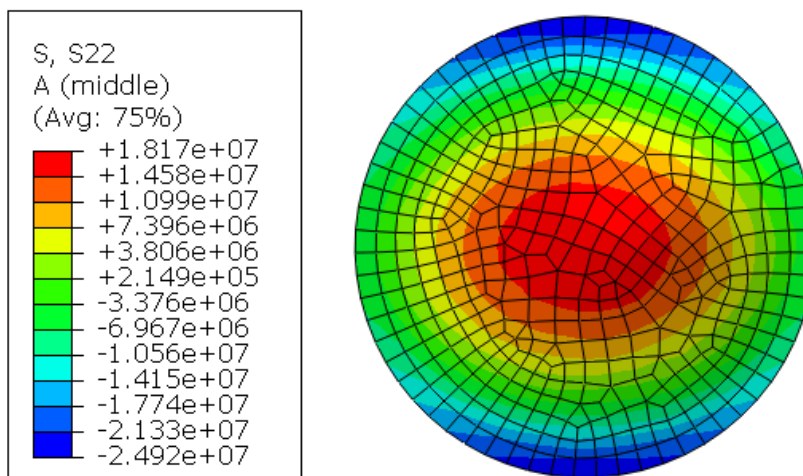


Fig.5.0.5 Tensión S22 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].

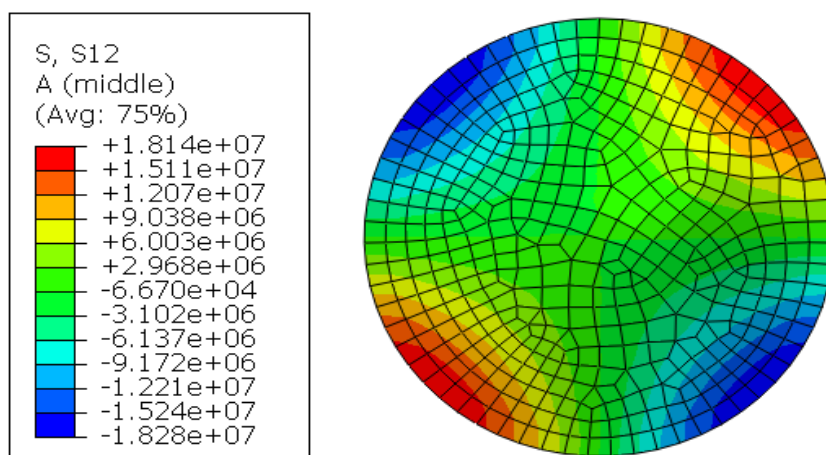


Fig. 5. 6 Tensión S12 en la lámina exterior A de placa circular [Pa].

Una vez realizado el análisis tensional se ha observado que las ecuaciones del criterio de tensiones se cumplen según se muestra en la tabla 5.4.

TABLA 5.4 ECUACIONES DEL CRITERIO DE TENSIONES PARA PLACA CIRCULAR CON MATERIALES COMPUESTOS.

$S_{11T} < X_T/3$	201 < 610 [MPa]
$S_{11C} < X_C/3$	344 < 365 [MPa]
$S_{22T} < Y_T/3$	18 < 19 [MPa]
$S_{22C} < Y_C/3$	25 < 76 [MPa]
$S_{12} < S/3$	18 < 23,6 [MPa]

Puesto que se han conseguido buenos resultados para la distribución del laminado descrito anteriormente, el espesor de la lámina para este caso ha resultado ser una composición de 13 repeticiones del apilamiento A-B-C-D multiplicado a su vez por 2, puesto que se trata de un laminado simétrico.

Por tanto, el espesor de la placa ha sido calculado con la siguiente ecuación siendo 'e' el espesor de cada lámina y 'k' el número de repeticiones del laminado.

$$h = 2 \cdot (k \cdot 4 \cdot e) \quad (5.23)$$

$$h = 2 \cdot (13 \cdot 4 \cdot 0,0002) \quad (5.24)$$

A continuación se muestran los resultados del espesor y el peso de la placa para esta propuesta:

Espesor de la placa, $h = 20,8\text{mm}$

Masa de la placa = 90,17 kg

Los desplazamientos que se han obtenido con esta configuración son los siguientes:

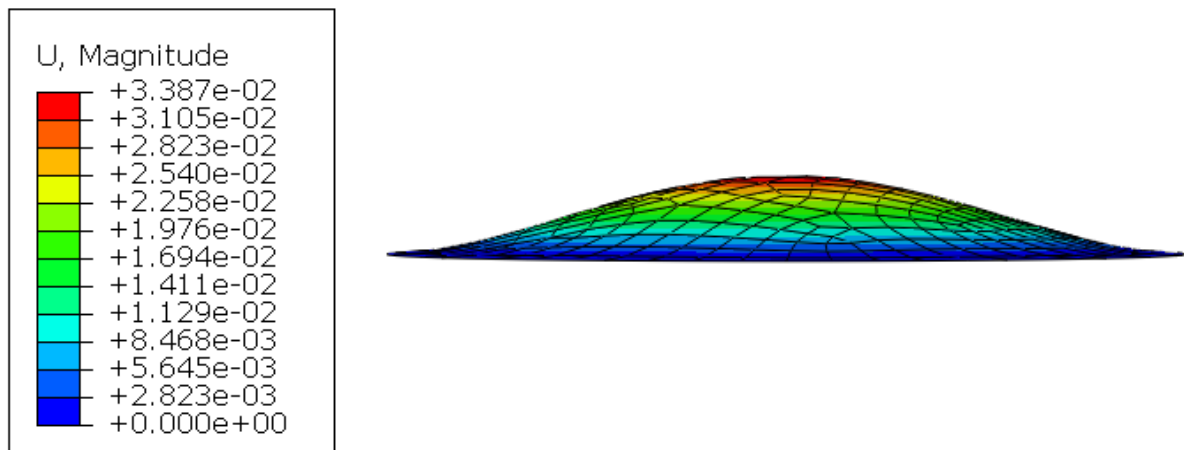


Fig. 5.7 Desplazamientos en placa circular de fibra de carbono [m]

5.1.3 Placa circular con refuerzo.

Una vez que han sido estudiados los resultados de una placa circular con diferentes materiales, se ha optado por mejorar la propuesta. A continuación se ha realizado un estudio de las opciones de Aluminio y Fibra de carbono añadiendo una serie de refuerzos en forma de nervios.

5.1.3.1 Placa circular con refuerzo. Material isótropo.

La placa se ha reforzado con una serie de nervios con el objetivo de mejorar sus prestaciones. Se ha llevado a cabo el análisis de diferentes geometrías de nervios para así elegir la opción más óptima, es decir, la que consiga reducir los desplazamientos procurando conseguir el menor peso adicional en la placa. De este modo, ha sido posible comprobar si este tipo de solución produce mejores resultados.

El análisis de estos casos se ha realizado con el Método de Elementos Finitos, el cual nos permite obtener soluciones correctas puesto que su validez ha sido comprobada con anterioridad.

El punto de partida ha sido dimensionar los nervios. Se ha estudiado la placa circular con nervios dispuestos en forma radial y separados 90° entre sí, a estos nervios se les ha

conferido el mismo espesor y material que el de la placa.

La geometría y disposición de los nervios estudiados han sido las que se muestran en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

Nervios tipo 1

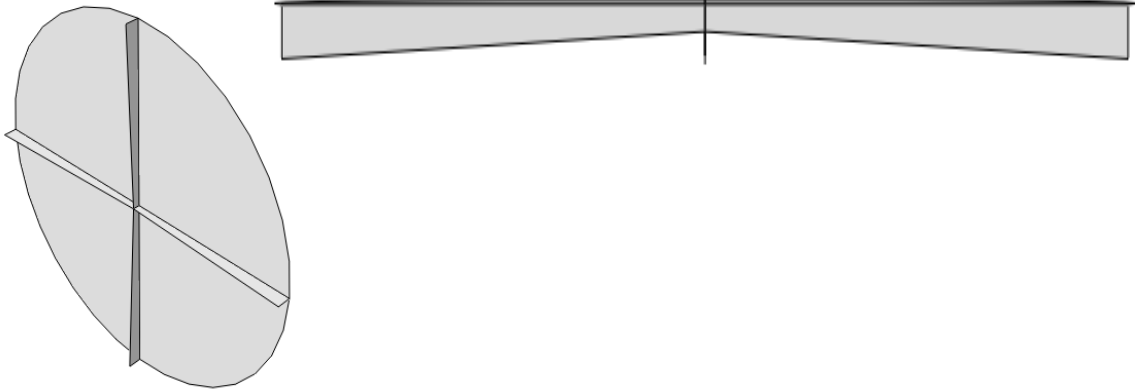


Fig. 5. 8 Nervios tipo 1 en placa circular.

Nervios tipo 2:

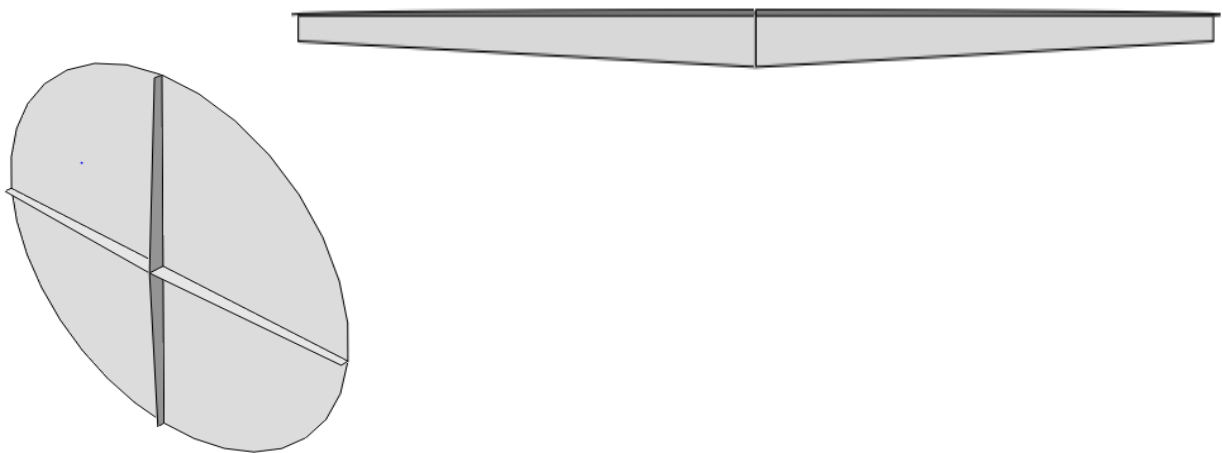


Fig. 5.9 Nervios tipo 2 en placa circular.

Nervios tipo 3:



Fig.5.10 Nervios tipo 3 en placa circular.

Para descartar las opciones menos favorecedoras y seleccionar la que más ventajas proporcione, se ha realizado un estudio en base a los desplazamientos que se producen con la utilización de cada tipo de refuerzo. Se han dimensionado los nervios de tal forma que añaden el mismo peso extra a la placa para así obtener la solución más ventajosa haciendo uso del criterio 3.

El proceso de selección se ha llevado a cabo en base al estudio sobre el material Aluminio 7075-T6 ya que ha sido el seleccionado en apartados anteriores por resultar ser el más ligero entre los materiales isótropos.

A continuación se han comparado los desplazamientos que sufre la placa con el uso de cada tipo de nervio y se ha escogido el que menos desplazamiento máximo ha sufrido.

-Tipo 1.

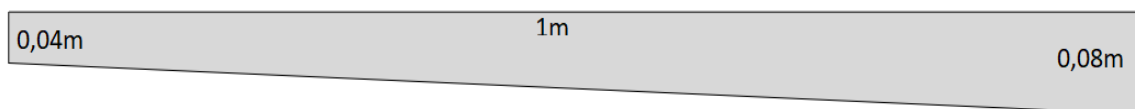


Fig. 5.11 Dimensiones nervios tipo 1 placa circular.

Masa adicional, siendo ' S_n ' la superficie del nervio y ' h ' el espesor:

$$m_a = 4 \cdot S_n \cdot h \cdot \rho \quad (5.25)$$

$$m_{a1} = 4 \cdot (0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,022 \cdot 2810 = 14,84 \text{ kg} \quad (5.26)$$

Desplazamientos:

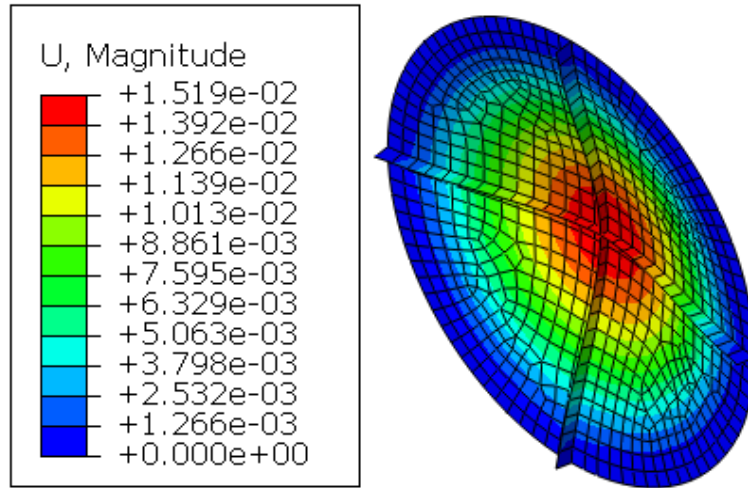


Fig.5.12 Desplazamientos con nervios tipo 1 placa circular de Aluminio.[m]

-Tipo 2.

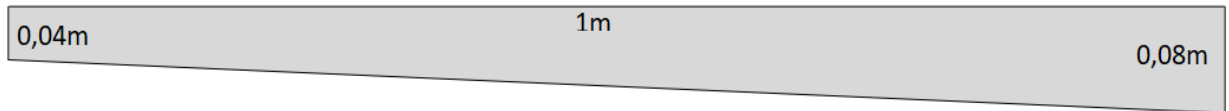


Fig.5.13 Dimensiones nervios tipo 2 placa circular.

Masa adicional:

$$m_a = 4 \cdot S_n \cdot h \cdot \rho \quad (5.27)$$

$$m_{a2} = 4 \cdot (0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,022 \cdot 2810 = 14,84 \text{ kg} \quad (5.28)$$

Desplazamientos:

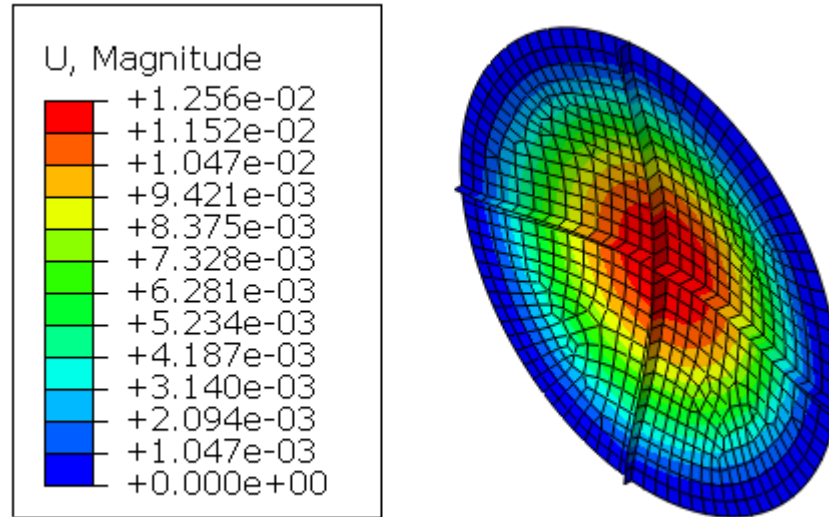


Fig.5.14 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa circular de Aluminio [m].

-Tipo 3:

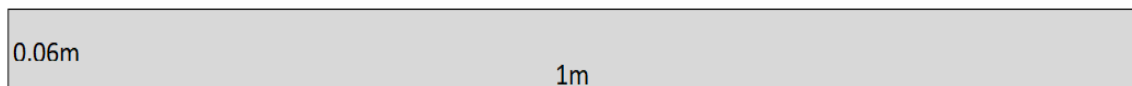


Fig.5. 15 Dimensiones nervios tipo 3 placa circular.

Masa adicional:

$$m_a = 4 \cdot S_n \cdot h \cdot \rho \quad (5.29)$$

$$m_{a3} = 4 \cdot (0,06 \cdot 1) \cdot 0,022 \cdot 2810 = 14,84 \text{ kg} \quad (5.30)$$

Desplazamientos:

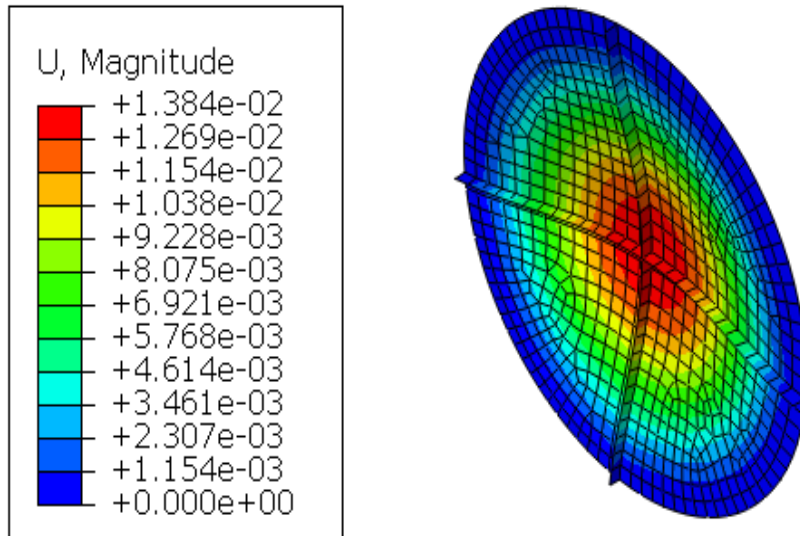


Fig.5.16 Desplazamientos con nervios tipo 3 placa circular de Aluminio [m]

En la tabla 5.5 se muestra una recopilación de los resultados que han sido obtenidos respecto a desplazamientos máximos.

TABLA 5.5 DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS PARA PLACA CIRCULAR CON NERVIOS DE MATERIAL ISÓTROPO.

Nervios	Desplazamiento máximo [mm]
Tipo 1	15,19
Tipo 2	12,56
Tipo 3	13,84

Como se ha podido observar, los desplazamientos menores se han conseguido con los nervios tipo 2. Estos resultados han permitido seleccionar los nervios tipo 2 para configuraciones futuras de geometría circular.

5.1.3.2 Placa circular con refuerzo. Material compuesto.

En este apartado se han obtenido los resultados para una placa circular de fibra de carbono haciendo uso de refuerzos del mismo material. Puesto que en el apartado anterior se consiguieron mejores resultados para los nervios tipo 2 este paso se ha simplificado estudiando únicamente este tipo de nervios.

En primer lugar, al comprobar el criterio de tensiones una vez añadidos los refuerzos en forma de nervios en disposición radial, se ha observado que la ecuación 5.20 respecto a S_{11C} no se cumple puesto que dicha tensión supera la tensión límite del criterio. En la figura 5.17 se pueden observar las tensiones que soporta la placa en esta configuración.

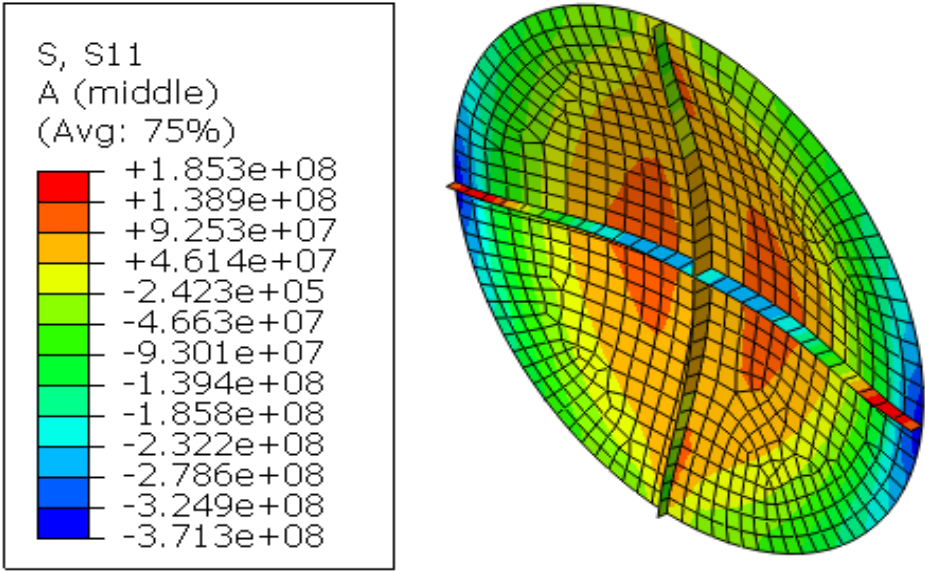


Fig.5.17 Tensión S11 en placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2 para espesor con 13 repeticiones [Pa].

$S_{11C} < X_C/3$	$371 \leq \leq 365 \text{ [MPa]}$
-------------------	-----------------------------------

Podemos observar que no se cumple la relación del criterio, por tanto, para esta configuración, será necesario añadir espesor extra a toda la placa y nervios de tal manera que el apilamiento A-B-C-D tendrá 14 repeticiones en lugar de 13 como se había estudiado en el apartado 4.1.2.

Al aumentar el espesor, las tensiones disminuyen y se consigue que se cumplan correctamente los criterios establecidos. Los valores tensionales que se obtienen con el cambio de espesor se muestran en la figura 5.18.

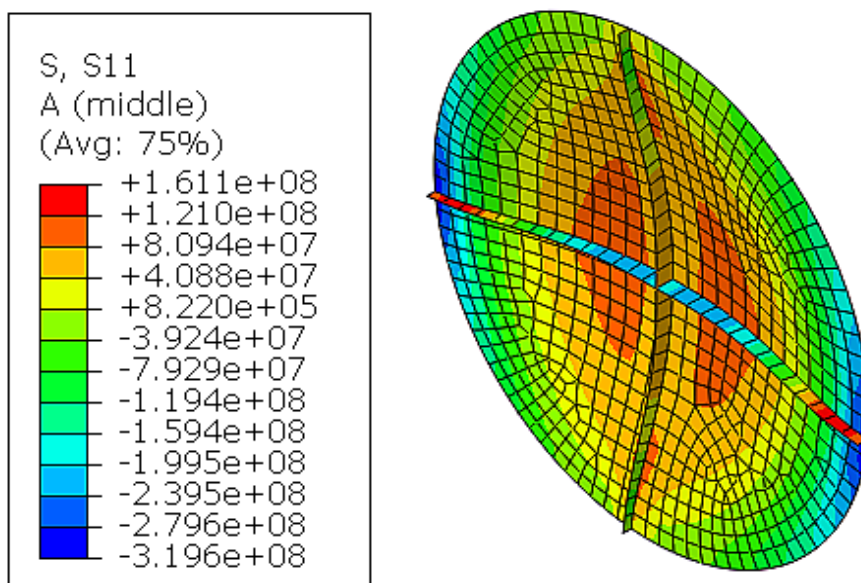


Fig.5.18 Tensión S11 en placa circular de fibra de carbono con nervios tipo 2 para espesor con 14 repeticiones [Pa].

Por tanto, la relación del criterio de tensiones toma los valores que se muestran a continuación y pasa a ser válida.

$S11_C < X_C/3$	$319 < 365 \text{ [MPa]}$
-----------------	---------------------------

Con esta configuración la placa adquiere mayor peso debido al incremento del espesor.

El espesor de la placa para 14 repeticiones del apilamiento A-B-C-D se ha calculado con la siguiente expresión, siendo 'e' el espesor de cada lámina y 'k' el número de repeticiones del apilamiento.

$$h=2 \cdot (k \cdot 4 \cdot e) \quad (5.31)$$

$$h= 2 \cdot (14 \cdot 4 \cdot 0,0002) \quad (5.32)$$

Por tanto, se han obtenido los siguientes resultados de peso y espesor:

Espesor de la placa, $h=0,0224\text{m}$

Peso de la placa = 97,11 Kg.

El peso extra debido a los nervios ha tomado el valor calculado a continuación:

$$m_a = 4 \cdot S_n \cdot h \cdot \rho \quad (5.33)$$

$$m_a = 4 \cdot (0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,0224 \cdot 1380 = 7,42 \text{ kg} \quad (5.34)$$

Lo que conforma un peso total de 104,53 kg

En este caso los desplazamientos que se han obtenido han sido los siguientes:

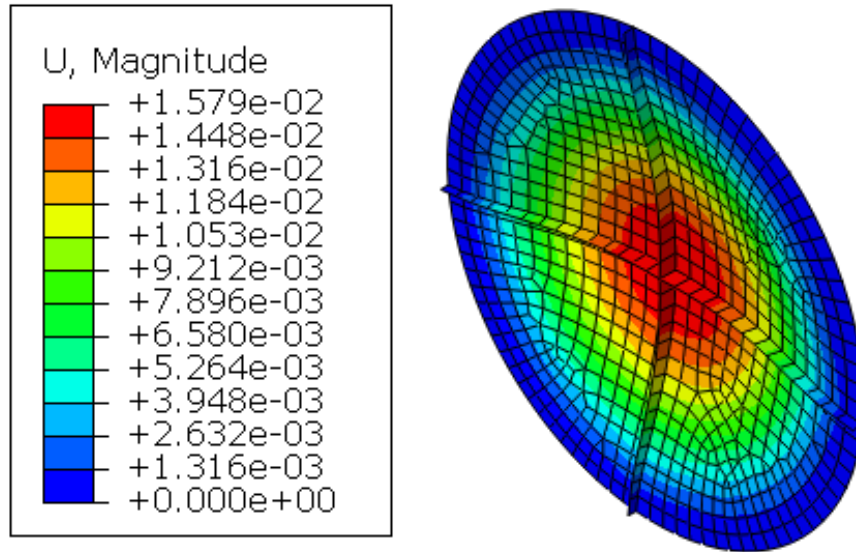


Fig.5.19 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa circular de fibra de carbono [m].

5.2 Placa rectangular.

A continuación se ha realizado el análisis tomando una placa de geometría rectangular. Las condiciones de contorno y los esfuerzos a los que la placa está sometida siguen siendo los mismos, por tanto, se ha estudiado una placa rectangular empotrada en todos sus bordes y sometida a una carga transversal uniforme.

A su vez, se han estudiado los mismos casos que para la geometría circular:

En primer lugar se ha comprobado el comportamiento de la placa utilizando materiales simples con características isotrópicas. Se ha llevado a cabo el estudio analítico basado en el manual “Roark's Formulas for Stress and Strain” [16] y se ha comprobado seguidamente la factibilidad del Método de los Elementos Finitos. Posteriormente se han analizado las posibles ventajas de utilizar materiales compuestos como es la fibra de carbono. Y, por último, se ha realizado una recopilación de resultados del uso de refuerzos en forma de nervios con diferentes geometrías para el material isotrópico más ventajoso y para la fibra de carbono.

5.2.1 Placa rectangular. Materiales simples.

A continuación se ha realizado el estudio de una placa rectangular de 1,5m de ancho por 2m de largo, sometida a una carga transversal uniforme y empotrada en todos sus extremos.

La placa ha sido estudiada utilizando diferentes materiales con características isotrópicas, se han analizado los resultados para los materiales Aluminio, Acero y Titanio.

El objetivo ha sido calcular el espesor necesario para cada caso y descartar los materiales que produzcan mayor masa. De este modo se ha conseguido una posible solución para el proyecto en cuestión.

Para partir de una base analítica y así poder corroborar la validez del uso del Método de Elementos Finitos para geometría rectangular en soluciones posteriores, se han utilizado las relaciones recogidas por el manual “Roark's Formulas for Stress and Strain” [16] para el cálculo de tensiones y desplazamientos de placas rectangulares con carga transversal uniformemente repartida y pequeñas deformaciones.

El criterio de tensiones ha sido aplicado en los siguientes casos:

-Tensión máxima en el borde de la placa. ($\sigma_{r=a}$)

-Tensión máxima en el centro de la placa. ($\sigma_{r=0}$)

Haciendo uso del criterio 1, se ha pretendido que el material trabaje de forma elástica sin llegar a deformaciones plásticas. Por tanto, la tensión máxima admisible ha tomado el valor del límite elástico (σ_y) teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad $n=3$, de este modo se ha trabajado comprobando el cumplimiento de la siguiente ecuación:

$$\sigma < \sigma_y/3 \quad (5.35)$$

Según el manual “Roark's Formulas for Stress and Strain” la tensión máxima para una placa rectangular empotrada sometida a una carga uniforme se describe con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \beta \cdot q \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^2 \quad (5.36)$$

El coeficiente β ha sido obtenido de las siguientes formas:

-Centro de la placa:

$$\beta_c = \frac{1}{4 \cdot (1 + \alpha^4)} \quad (5.37)$$

-Borde de la placa:

$$\beta_B = \frac{1}{2 \cdot (1 + \alpha^4)} \quad (5.38)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{c}{l} \quad (5.39)$$

Con c = lado pequeño = 1,5m y l = lado grande = 2m

Despejando de estas ecuaciones, se han obtenido las relaciones para calcular el espesor en cada caso:

-Caso borde de la placa:

$$h > \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (1 + \alpha^4)} \cdot q \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_y/3}} \quad (5.40)$$

-Caso centro de la placa:

$$h > \sqrt{\frac{1}{4 \cdot (1 + \alpha^4)} \cdot q \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_y/3}} \quad (5.41)$$

A continuación se recogen los resultados para las tensiones máximas en el borde y centro de la placa para cada material haciendo uso de las ecuaciones anteriores.

TABLA 5.6 ESPESOR DE PLACA RECTANGULAR MATERIALES ISÓTROPAS.

Caso	Espesor Acero [mm]	Espesor Aluminio[mm]	Espesor Titanio[mm]
$\sigma_{\text{máxBorde}}$	$h > 12,68$	$h > 22,57$	$h > 16,4$
$\sigma_{\text{máxCentro}}$	$h > 8,97$	$h > 15,96$	$h > 11,61$
Máximo redondeado	$h = 13$	$h = 23$	$h = 17$

Con los resultados de espesor que han sido obtenidos, se ha calculado el peso que tendría cada placa para así escoger la más ligera. Para ello se ha hecho uso de las siguientes ecuaciones:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot h \cdot S \quad (5.42)$$

$$S = l \cdot c \quad (5.43)$$

TABLA 5.7 MASA DE PLACA RECTANGULAR CON MATERIALES ISÓTROPAS.

Material	Acero	Aluminio	Titanio
Peso de la placa [kg]	302,25	193,89	225,42

De este modo se ha observado que el Aluminio es el material que más favorece el criterio de mínimo peso.

- Comparación de resultados analíticos con Método de Elementos Finitos:

Con el objetivo de establecer el Método de Elementos Finitos como válido para futuras conclusiones realizadas en el apartado de geometría rectangular, se ha realizado una comprobación de los resultados obtenidos en ambos casos para el material Aluminio. De este modo, se muestran a continuación los resultados y el margen de variación respecto a tensiones y desplazamientos para así poder asegurarnos que las conclusiones futuras son aceptables.

-Flecha máxima.

Del manual “Roark's Formulas for Stress and Strain” se ha obtenido la ecuación para calcular el desplazamiento máximo en el caso de placa rectangular empotrada y sometida a una carga uniforme:

$$\frac{w_{m\acute{a}x}}{h} = \delta \cdot \frac{q}{E} \cdot \left(\frac{c}{h}\right)^4 \quad (5.44)$$

El coeficiente δ para una placa empotrada en todo su entorno se ha calculado de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{1 - \nu^2}{\delta_0} \quad (5.45)$$

$$\delta_0 = 32 \cdot (1 + \alpha^2) \quad (5.46)$$

Para el espesor seleccionado $h=23\text{mm}$ y haciendo uso de las propiedades del Aluminio se ha obtenido: $w_{m\acute{a}x}=0,01227\text{m}$

Por otro lado, si analizamos los resultados por el Método de Elementos Finitos se han observado los siguientes resultados:

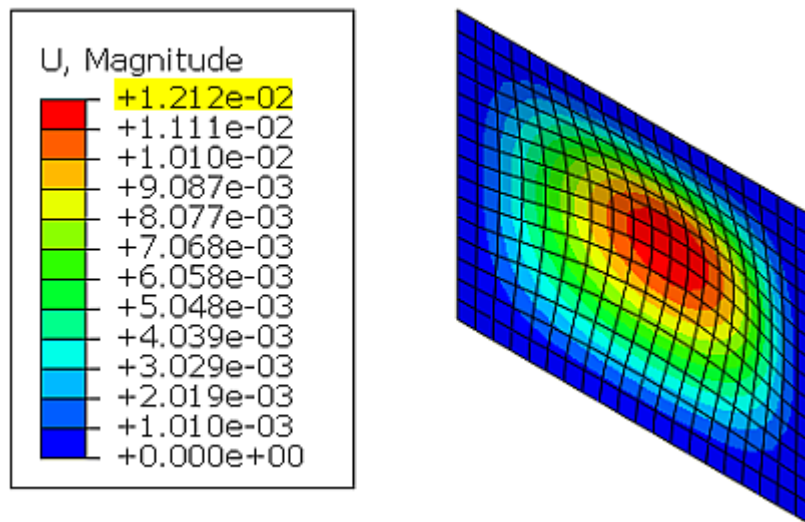


Fig.5.20 Desplazamientos en placa rectangular de Aluminio [m].

Con este método se ha obtenido un desplazamiento máximo de 0,01212m. La variación de resultados entre ambos métodos es mínima por lo que se estima que su utilización es válida. Sin embargo, para poder confirmarlo se comprueban del mismo modo las tensiones máximas obtenidas.

-Tensión máxima.

Por otro lado, partiendo de que la tensión máxima se da en el borde de la placa y haciendo uso de las ecuaciones 5.36 y 5.37 y de las propiedades del Aluminio, para un espesor $h=23\text{mm}$, la tensión máxima obtenida de forma analítica es de 161,55 MPa.

Si comprobamos los resultados para el método de elementos finitos obtenemos:

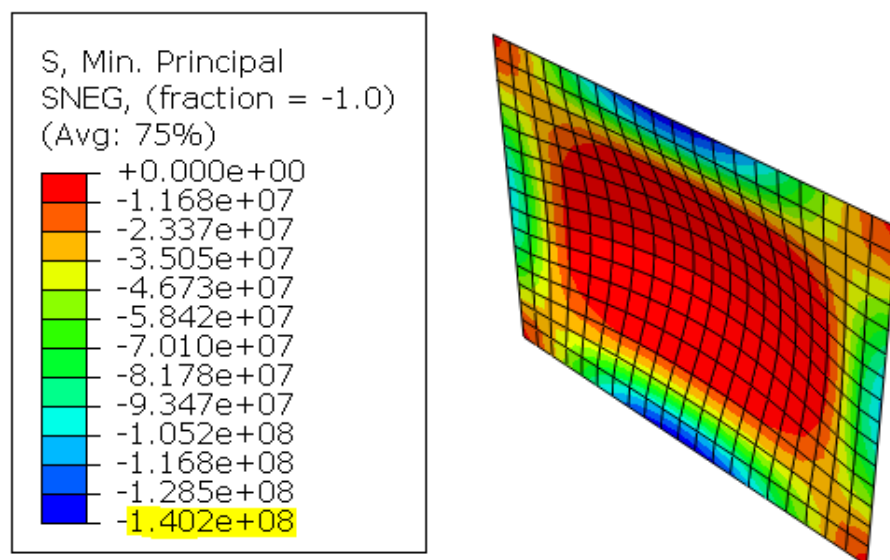


Fig.5.21 Tensiones en placa rectangular de Aluminio [Pa].

Se ha podido comprobar que la tensión máxima en el borde según el Método de Elementos Finitos es, en magnitud, de 140,2 Mpa, lo que supone un porcentaje de variación aceptable.

En cuanto a las tensiones, ya se ha explicado con anterioridad que se trata de un criterio de magnitud local y se espera y acepta cierta variación entre los métodos debido a la restricción nodal de la versión Abaqus utilizada.

Por tanto, podemos concluir que la utilización de ambos métodos es válida y por ello se ha hecho uso del Método de Elementos Finitos para dimensionar configuraciones rectangulares posteriores.

5.2.2 Placa rectangular. Material compuesto.

Las ecuaciones estudiadas en el manual *Roark's Formulas for Stress and Strain* que han sido utilizadas en el apartado anterior no son aplicables en este caso debido a la anisotropía de los materiales. Esta parte del proceso de diseño ha sido analizada con el Método de Elementos Finitos, haciendo uso de la herramienta Abaqus.

El procedimiento para el dimensionamiento de este caso ha sido el mismo que el seguido para placa circular con materiales compuestos. Como se ha citado con anterioridad, el estudio de estructuras con materiales compuestos es complejo y se pueden tomar las explicaciones del apartado 4.1.2 como referencia para este. Por tanto, el espesor se ha configurado añadiendo láminas de forma progresiva hasta que se ha conseguido el cumplimiento del criterio de tensiones.

El criterio que ha sido utilizado implica que no se superen las tensiones límite guardando el coeficiente de seguridad $n=3$, por tanto, las ecuaciones que se muestran a continuación han de cumplirse en todo momento para que no se superen los límites tensionales en ninguna de las direcciones.

$$S_{11T} < X_T/3 \quad (5.47)$$

$$S_{11C} < X_C/3 \quad (5.48)$$

$$S_{22T} < Y_T/3 \quad (5.49)$$

$$S_{22C} < Y_C/3 \quad (5.50)$$

$$S_{12} < S/3 \quad (5.51)$$

El apilamiento utilizado para el laminado es $[0/90/45/-45]_s$ siendo el espesor de cada lámina de $e=0,2\text{mm}$. De este modo ha sido posible hallar el espesor mínimo para cumplir los requisitos y con ello el peso de la placa.

Una vez realizado el proceso de añadir láminas de forma progresiva comprobando las tensiones en cada paso de tal forma que se consiga el menor número de repeticiones del apilamiento sin que se sobrepasen los límites tensionales, cuando la disposición es de 14 repeticiones del apilamiento A-B-C-D, se consigue que se cumplan las ecuaciones descritas para el criterio de tensiones.

El Método de Elementos Finitos ha permitido observar las tensiones que existen en cada lámina de la placa. Como ya se ha comentado anteriormente, cada lámina sufre un nivel de tensión distinto y, en este caso, a diferencia de la geometría circular, al tratarse de una geometría rectangular en la que la longitud de fibras difiere para las diferentes direcciones, la lámina más superficial no tiene por qué ser la que mayores tensiones soporte.

A continuación se muestra una recopilación de las tensiones soportadas por cada lámina en cada dirección de las 4 capas exteriores que han sido calculadas con Abaqus:

TABLA 5.8 TENSIONES PLACA RECTANGULAR CON MATERIALES COMPUESTOS.

Lámina	S11 [MPa] Tracción/Compresión	S22[MPa] Tracción/Compresión	S12 [MPa] Tracción/Compresión
A (0°)	83,1 / -260	<u>14,6 / -24,6</u>	8,6 / -8,7
B (90°)	<u>178 / -334</u>	9,1 / -18,4	8,5 / -8,5
C (45°)	128,7 / -168,4	11,6 / -15	<u>12,8 / -16,6</u>
D (45°)	127 / -165,3	11,3 / -14,7	<u>16,3 / -12,6</u>

Se pueden observar remarcadas las tensiones máximas que se han producido en cada dirección. Con 14 repeticiones del apilamiento se ha conseguido que las tensiones máximas cumplan las ecuaciones establecidas como criterio. A continuación, en las figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24 se muestran los resultados de las tensiones máximas que han sido mostradas anteriormente:

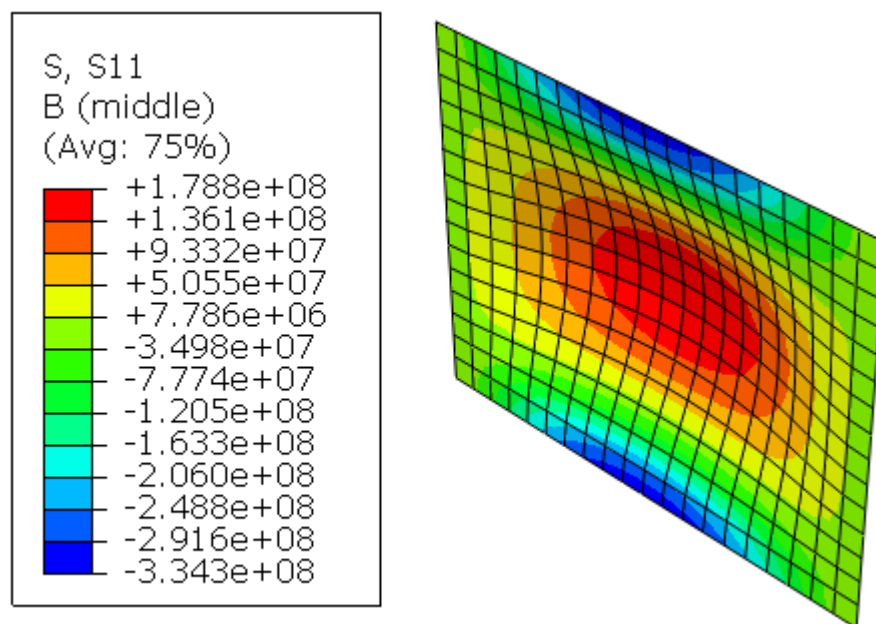


Fig.5.22 Tensión S11 en lámina B de placa rectangular [Pa].

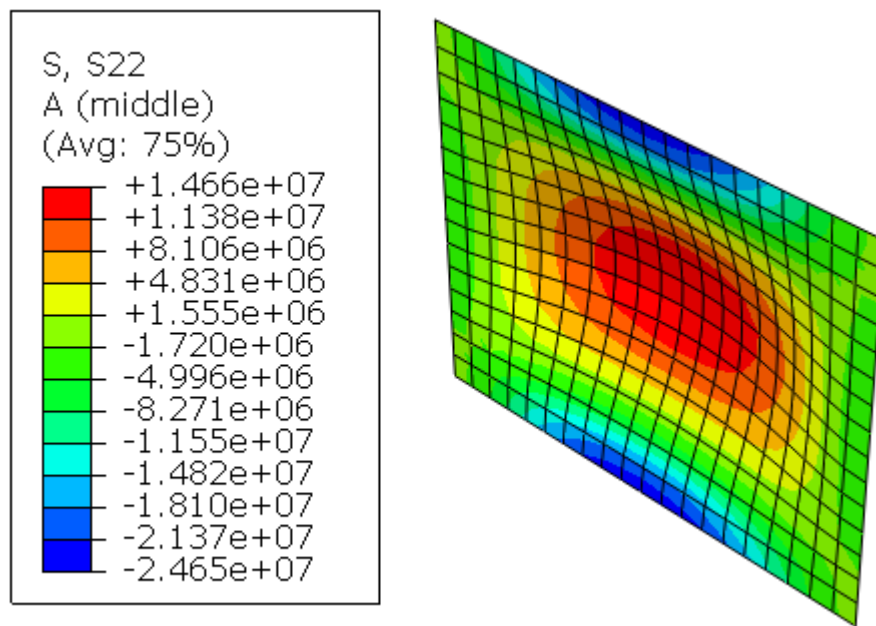


Fig.5.23 Tensión S22 en lámina A de placa rectangular [Pa].

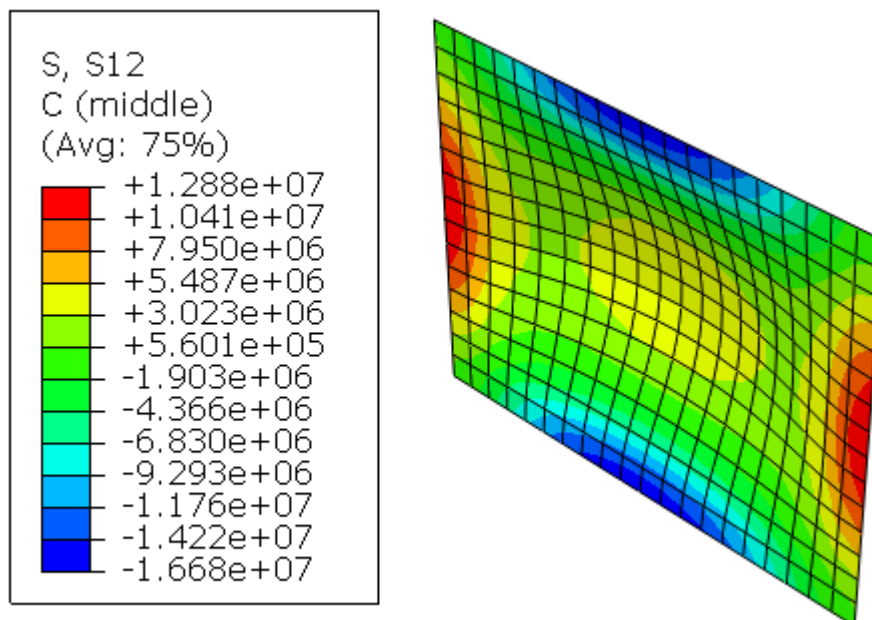


Fig.5.24 Tensión S12 en lámina C de placa rectangular [Pa].

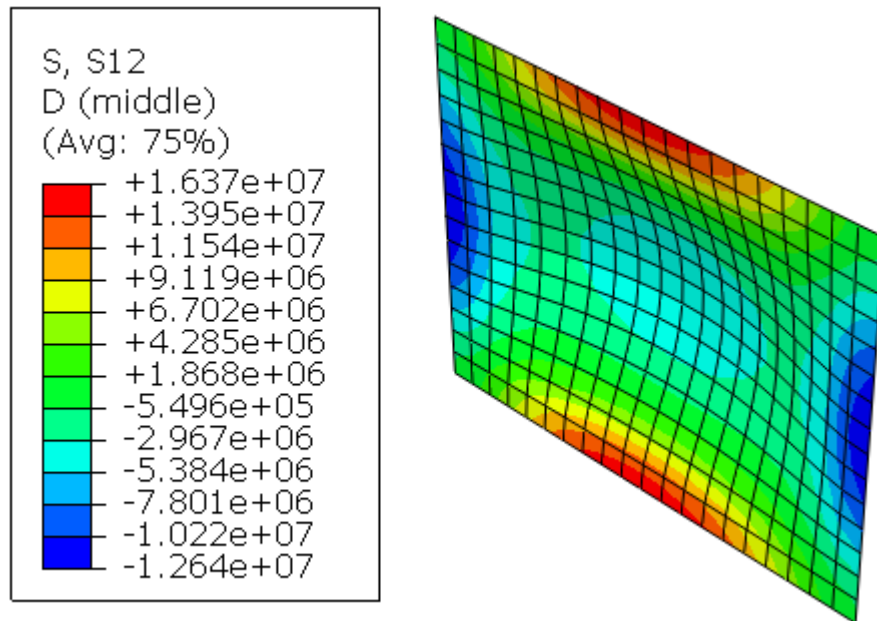


Fig.5.25 Tensión S12 en lámina D de placa rectangular [Pa].

Por tanto, las ecuaciones tomadas como criterio se cumplen de la forma que se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 5.9 ECUACIONES DEL CRITERIO DE TENSIONES PARA PLACA RECTANGULAR CON MATERIALES COMPUESTOS.

$S_{11T} < X_T/3$	178 < 610 [MPa]
$S_{11C} < X_C/3$	334 < 365 [MPa]
$S_{22T} < Y_T/3$	14,6 < 19 [MPa]
$S_{22C} < Y_C/3$	24,6 < 76 [MPa]
$S_{12} < S/3$	16,3 < 23,6 [MPa]

Como podemos ver S_{11C} es la tensión que restringe el dimensionamiento ya que es la más crítica respecto al límite de la relación y es la que nos impide reducir el espesor.

Con esta solución se ha obtenido el espesor de la lámina. Para este caso, se ha compuesto de 14 repeticiones del apilamiento A-B-C-D multiplicado a su vez por 2, puesto que se trata de un laminado simétrico.

El espesor de la placa ha sido calculado con la siguiente ecuación, siendo “e” el espesor de cada lámina y ‘k’ el número de repeticiones del apilamiento.

$$h=2\cdot(k\cdot4\cdot e) \quad (5.52)$$

$$h= 2\cdot(14\cdot4\cdot0,0002) \quad (5.53)$$

A continuación se han obtenido los resultados para esta propuesta:

Espesor de la placa, $h= 22,4\text{mm}$

Masa de la placa = 92,736 kg

Las deformaciones para esta configuración son las siguientes:

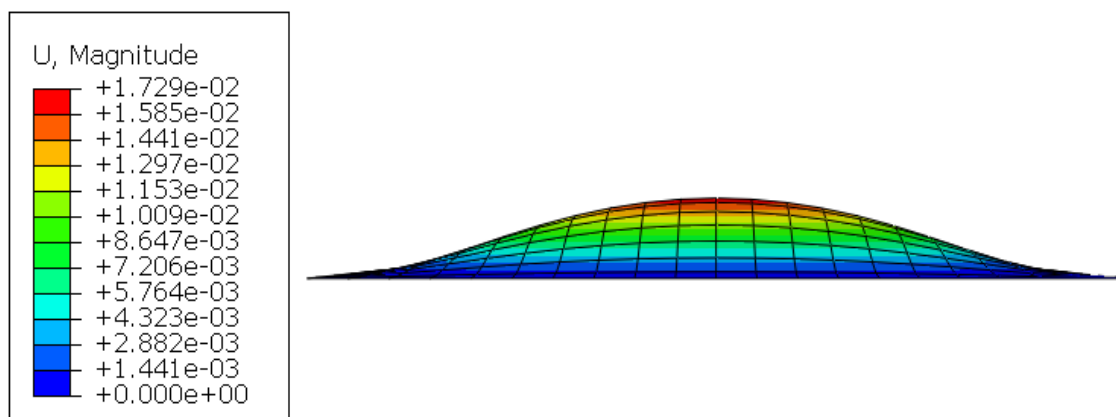


Fig.5.26 Desplazamientos en placa rectangular de fibra de carbono [m].

5.2.3 Placa rectangular con refuerzo.

A continuación se ha valorado la posibilidad de mejorar la propuesta rectangular haciendo uso de unos refuerzos en forma de nervios con el objetivo de mejorar las prestaciones para las que ha sido diseñada.

Se ha realizado el análisis de diferentes geometrías y se ha elegido la que consigue reducir más las deformaciones para un menor peso adicional en la placa. De este modo, se ha comprobado si este tipo de solución produce mejores resultados.

El análisis de estos casos se ha realizado con el Método de Elementos Finitos que nos ha permitido obtener soluciones correctas puesto que su validez ha sido comprobada con anterioridad.

5.2.3.1 Placa rectangular con refuerzo. Material simple.

Se han estudiado diferentes configuraciones con diferentes disposiciones y formas. A continuación, en las figuras 5.26, 5.27 y 5.28 se muestran las geometrías de nervios cuyos resultados se han analizado.

-Nervios tipo 1.

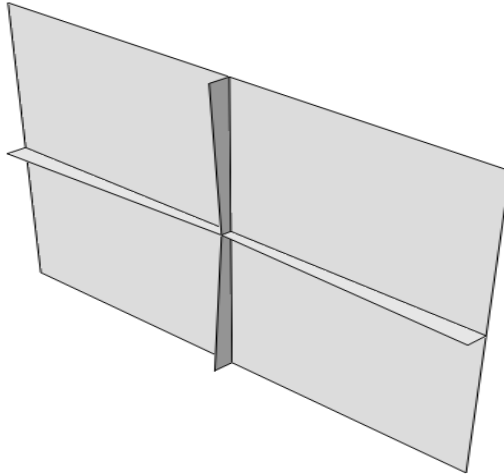


Fig.5.27 Nervios tipo 1 en placa rectangular.

-Nervios tipo 2.

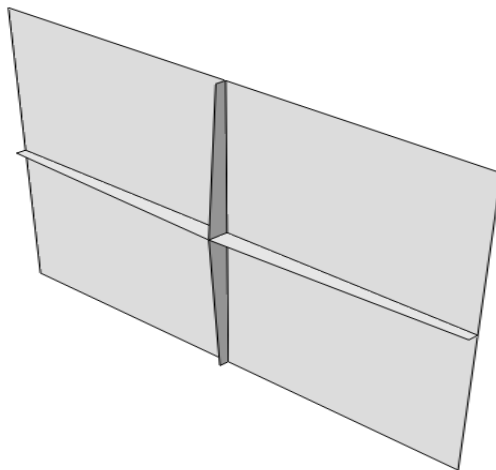


Fig.5.28 Nervios tipo 2 en placa rectangular.

-Nervios tipo 3.

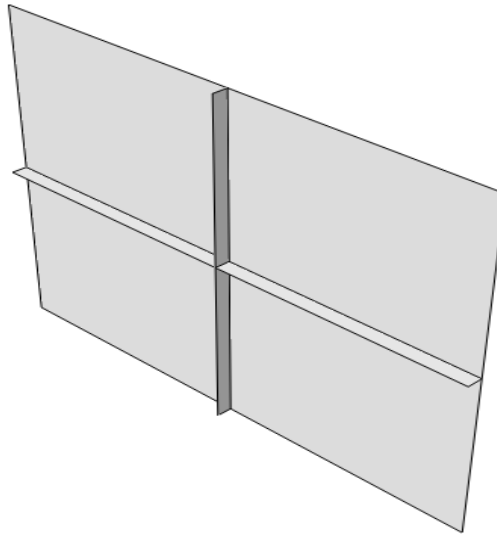


Fig.5.29 Nervios tipo 3 en placa rectangular.

Para seleccionar la solución más ventajosa se han comparado las deformaciones que ha sufrido cada placa con cada tipo de nervios así como el peso extra que han supuesto. De este modo, ha sido posible decantarse por la opción que menos desplazamientos ha originado para un menor peso adicional.

A continuación se muestra la recopilación de resultados obtenidos para la utilización de estos tres tipos de refuerzo sobre el material isótropo más ventajoso, el Aluminio. Cabe destacar que S_{nc} y S_{nl} representan la superficie de los nervios en cada caso en dirección del lado menor y mayor respectivamente.

- Nervios tipo 1.

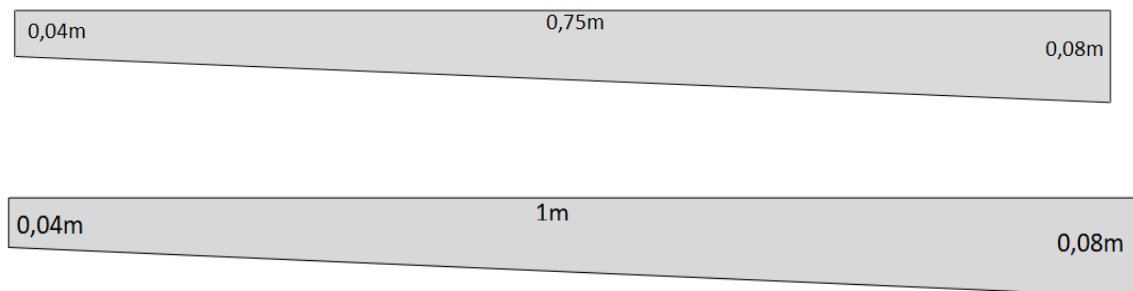


Fig.5.30 Dimensiones nervios tipo 1 placa rectangular.

Masa adicional:

$$m_a = 2 \cdot (S_{nc} \cdot h \cdot \rho) + 2 \cdot (S_{nl} \cdot h \cdot \rho) \quad (5.54)$$

$$m_{a1} = 2 \cdot [(0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,023 \cdot 2810] + 2 \cdot [(0,04 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,023 \cdot 2810] = 14,22 \text{ kg} \quad (5.55)$$

Desplazamientos:

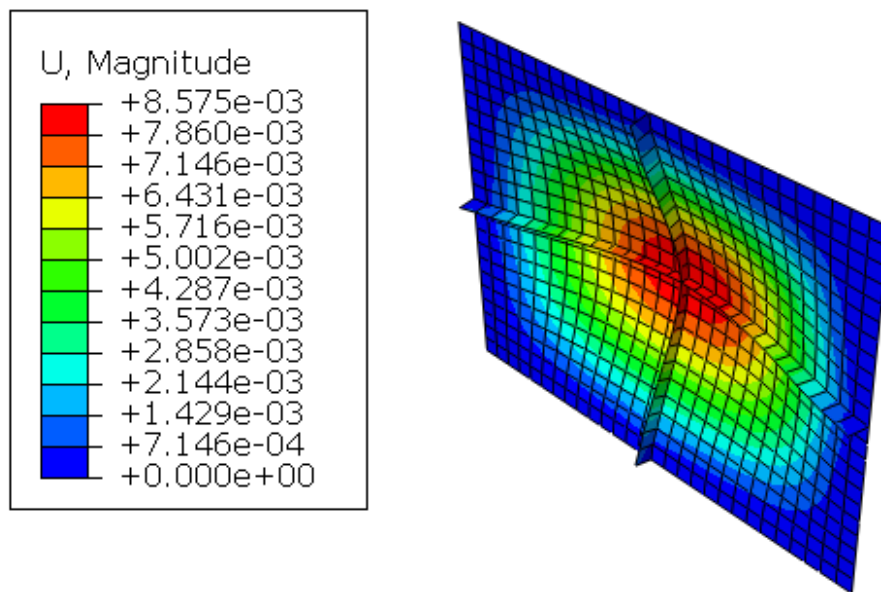


Fig.5.31 Desplazamientos con nervios tipo 1 placa rectangular de Aluminio [m].

-Nervios tipo 2.

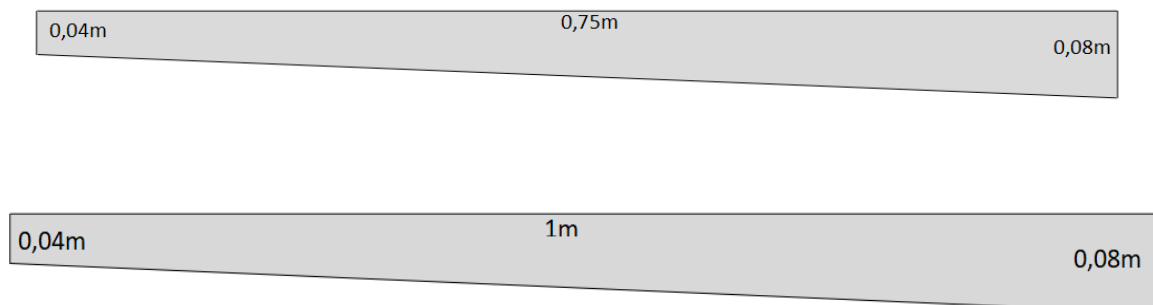


Fig.5.32 Dimensiones nervios tipo 2 placa rectangular.

Masa adicional:

$$m_a = 2 \cdot (S_{nc} \cdot h \cdot \rho) + 2 \cdot (S_{nl} \cdot h \cdot \rho) \quad (5.56)$$

$$m_{a2} = 2 \cdot [(0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,023 \cdot 2810] + 2 \cdot [(0,04 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,023 \cdot 2810] = 14,22 \text{ kg} \quad (5.57)$$

Desplazamientos

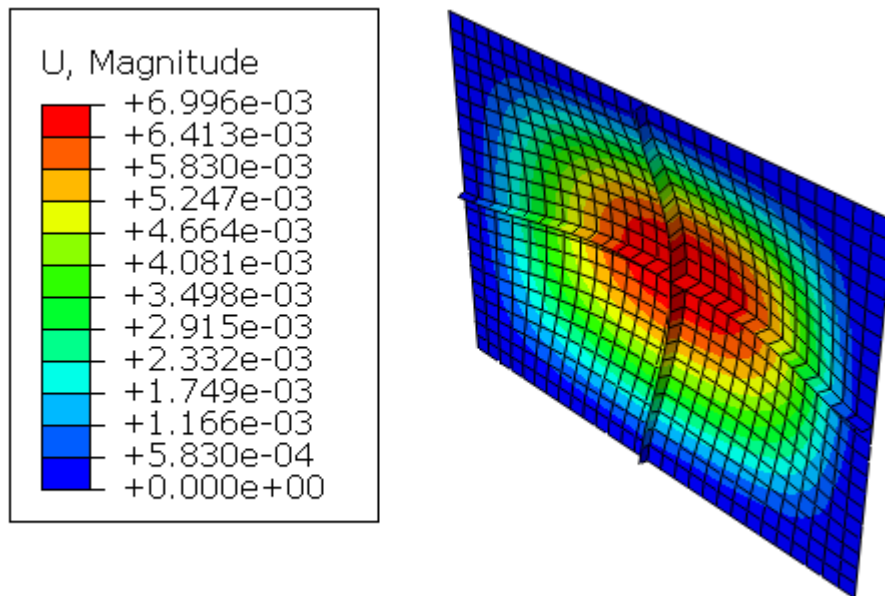


Fig.5.33 Desplazamientos con nervios tipo 2 placa rectangular de fibra de carbono [m].

-Nervios tipo 3.

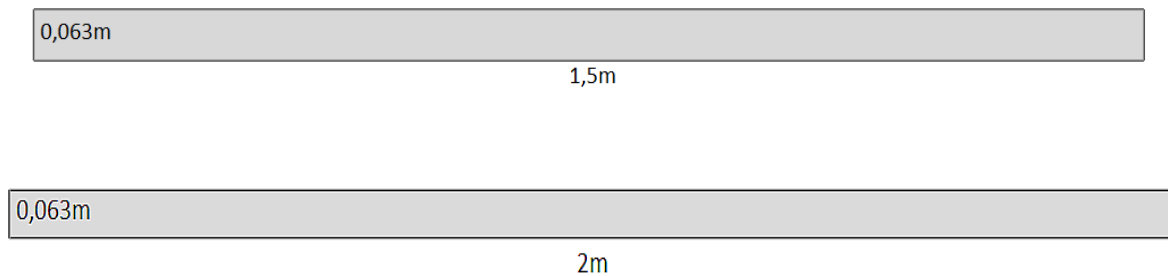


Fig.5.34 Dimensiones nervios tipo 3 placa rectangular.

Masa adicional:

$$m_a = (S_{nc} \cdot h \cdot \rho) + (S_{nl} \cdot h \cdot \rho) \quad (5.58)$$

$$m_{a3} = 0,063 \cdot 2 \cdot 0,023 \cdot 2810 + 0,063 \cdot 1,5 \cdot 0,023 \cdot 2810 = 14,25 \text{ kg} \quad (5.59)$$

Desplazamientos:

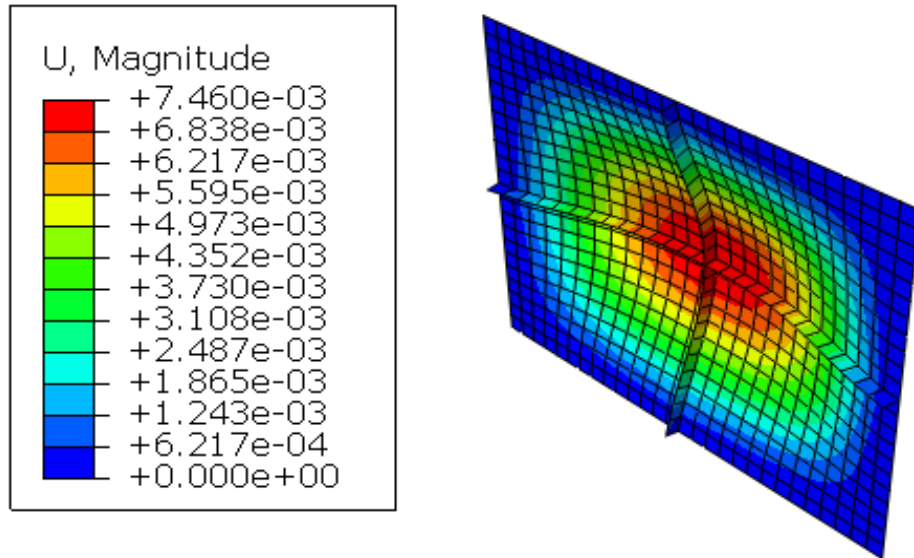


Fig.5.35 Desplazamientos con nervios tipo 3 placa rectangular de Aluminio [m].

La recopilación de resultados de desplazamientos máximos se muestra en la tabla 5.10.

TABLA 5.10 DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS PARA PLACA RECTANGULAR CON NERVIOS DE MATERIALES ISÓTROPO.

Nervios	Desplazamiento máximo [mm]
Tipo 1	8,57
Tipo 2	6,99
Tipo 3	7,46

Se han observado los resultados y se ha tenido en cuenta que el peso adicional que añade cada configuración es casi idéntico en todos los tipos, de este modo se ha podido obtener la conclusión de que el segundo tipo de refuerzo es el más favorecedor puesto que consigue los menores desplazamientos.

5.2.3.2 Placa rectangular con refuerzo. Material compuesto.

A continuación se muestra el análisis para una placa rectangular de fibra de carbono reforzada con una serie de nervios del mismo material. Como en el apartado anterior se ha comprobado que los nervios tipo 2 son los que proporcionan mejores resultados a la placa rectangular, este apartado se ha simplificado llevando a cabo únicamente el estudio de la utilización de este tipo de refuerzos.

En primer lugar, se ha comprobado que las ecuaciones del criterio de tensiones para materiales compuestos se cumplen. Como se ha visto anteriormente, la tensión más crítica es la S_{11c} por ello a continuación se muestran los resultados de la misma.

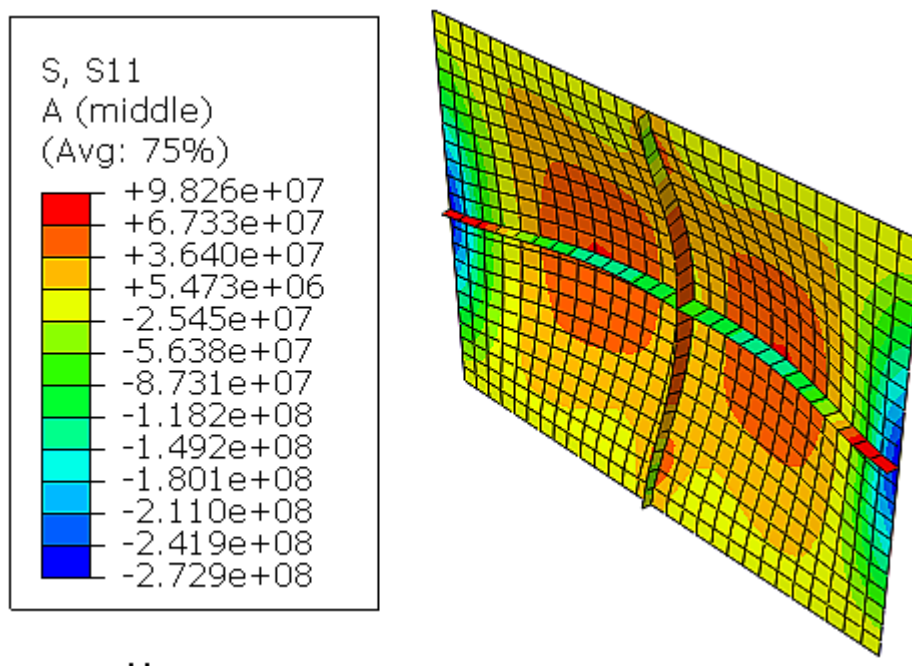


Fig.5.36 Tensión S11 en placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2 [Pa].

Como se puede comprobar a continuación, las tensiones máximas se encuentran dentro de los límites establecidos y cumplen las ecuaciones del criterio de tensiones.

$S_{11c} < X_C/3$	$272 < 365 \text{ [MPa]}$
-------------------	---------------------------

Por tanto, en este caso, no ha sido necesario aumentar el espesor y el peso de la placa sigue siendo el calculado en el apartado “placa rectangular con material compuesto” más la masa adicional referida a los nervios.

Masa adicional:

$$m_a = 2 \cdot (S_{nc} \cdot h \cdot \rho) + 2 \cdot (S_{nl} \cdot h \cdot \rho) \quad (5.60)$$

$$m_a = 2 \cdot [(0,04 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,0224 \cdot 1380] + 2 \cdot [(0,04 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,04) \cdot 0,0224 \cdot 1380] = 6,8 \text{ kg} \quad (5.61)$$

De este modo, la masa total de la placa en esta configuración ha adquirido un valor de 99,53 kg.

Los desplazamientos que han surgido en este caso se muestran en la figura 5.37.

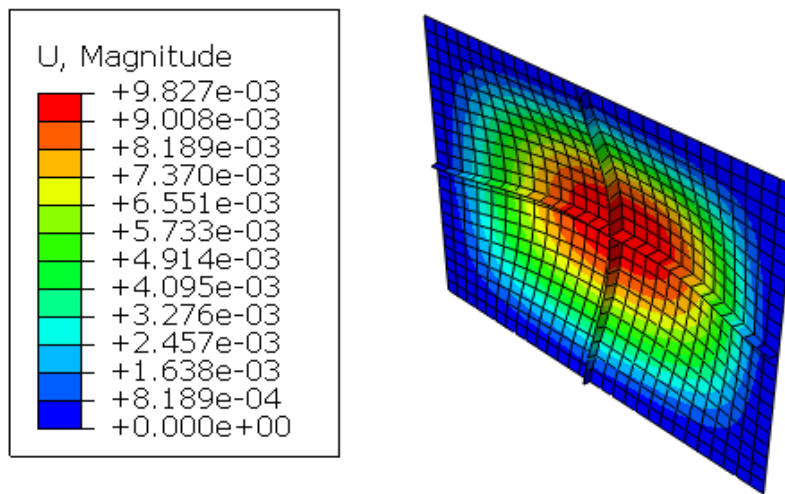


Fig.5.37 Desplazamientos en placa rectangular de fibra de carbono con nervios [m].

6. RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.

Nos encontramos en un paso decisivo para el proceso de diseño. A continuación se muestra una recopilación de las soluciones de peso y desplazamientos que han sido obtenidas para las configuraciones seleccionadas a lo largo del proceso de diseño. Una vez obtenidos los resultados se han comparado entre sí para así sopesar las ventajas y desventajas de cada posibilidad teniendo en cuenta los criterios que han permitido seleccionar la solución más óptima (criterio 2 y 3). Cabe destacar que el criterio 1 ha sido comprobado y se cumple en todos los casos.

TABLA 6.1 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.

Configuraciones	Peso [kg]	Desplazamiento máx [mm]
Placa circular Aluminio	194,21	21,9
Placa circular Material Compuesto	90,17	33,8
Placa circular Aluminio Nervios tipo 2	208,1	12,5
Placa circular Material Compuesto Nervios tipo 2	104,53	15,8
Placa rectangular Aluminio	193,89	12,1
Placa rectangular Material Compuesto	92,73	17,3
Placa rectangular Aluminio Nervios tipo 2	208,11	6,9
Placa rectangular Material Compuesto Nervios tipo 2	99,53	9,8

6.1 Selección de propuesta óptima.

Como hemos podido observar, el peso en configuraciones semejantes y de diferente geometría varía de forma mínima. Es decir, para la configuración simple con Aluminio, en geometría circular se ha obtenido una masa de 194,21 kg y en rectangular la solución ha adquirido un peso de 193,89 kg, por tanto, el criterio del peso no ha sido suficiente para elegir geometría de la placa.

Por otro lado, atendiendo a los desplazamientos, se ha observado que las configuraciones con geometría rectangular consiguen mejores soluciones puesto que la flecha máxima conseguida con la geometría rectangular respecto a la circular es menor

en todos los casos semejantes. Además, solo con la geometría rectangular se consigue validar el criterio de máximo desplazamiento iguala 10mm. Por tanto, como primera solución se ha obtenido que la geometría rectangular proporciona un resultado más óptimo en todas las configuraciones.

En cuanto a materiales, la fibra de carbono ha permitido conseguir unas altas cualidades aportando un bajo peso a la placa, ya que su densidad es mucho menor que la del Aluminio. A pesar de que los desplazamientos han aumentado respecto al Aluminio, la ventaja conseguida respecto al peso es de gran relevancia. Además, se ha tenido en cuenta la posterior mejora facilitada por el uso de refuerzos, lo que ha permitido disminuir los desplazamientos. Por ello, se ha tomado como material final la fibra de Carbono, puesto que es el que confiere mejores resultados a la solución en cuanto a peso con una diferencia muy importante respecto al material isótropo.

Por último, se han analizado los resultados obtenidos al añadir refuerzos en forma de nervios a la placa. Añadir nervios ha supuesto un aumento del peso de la placa pero, por otro lado, cabe destacar que también ha permitido reducir notablemente los desplazamientos de la misma, lo que ha conferido seguridad al diseño y ha permitido optimizar el resultado final de tal manera que ha permitido el cumplimiento del criterio 3 que establece como solución factible aquella que consiga desplazamientos menores a 10mm. Por tanto, concluimos que la opción de añadir nervios a la configuración ha resultado favorecedora para nuestro diseño final.

De este modo, tras el análisis llevado a cabo y las comparaciones realizadas, optamos por tomar como opción más ventajosa la solución de placa rectangular con material compuesto y reforzada con nervios tipo 2.

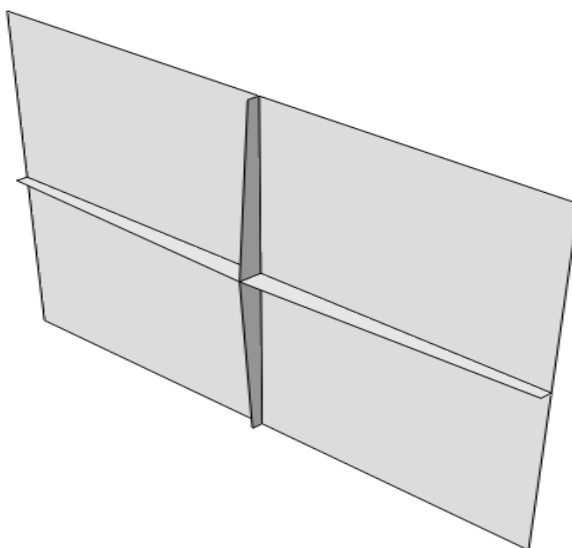


Fig.6.1 Diseño seleccionado de placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2.

6.2 Desarrollo y mejora de la opción seleccionada.

Una vez que ha sido seleccionada la configuración más ventajosa habiendo sido estudiadas todas bajo las mismas condiciones, se ha procedido a trabajar sobre ella y conseguir la mejor versión de la misma. Para ello se ha jugado con las dimensiones de los refuerzos de tal modo que se ha conseguido optimizar la solución. Se ha analizado la posible mejora que puede conllevar exagerar la geometría de los nervios de tal forma que se han ensanchado en el centro y se han afinado en los bordes para conseguir mejoras en los resultados.

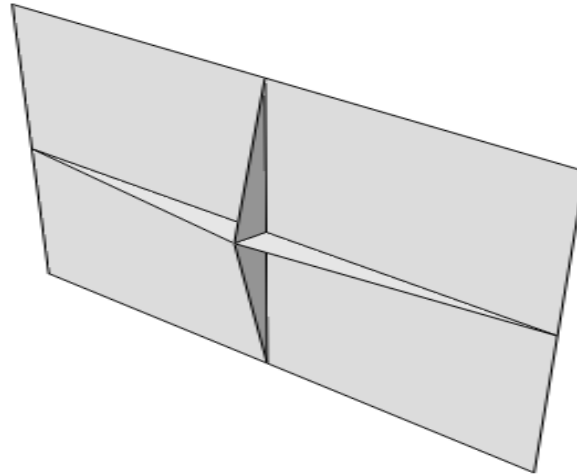


Fig.6.2 Diseño final mejorado.

Los resultados con esta modificación han sido los siguientes:

-En cuanto a las tensiones, se ha observado que la ecuación más crítica del criterio de tensiones correspondiente a S_{11c} se cumple, por tanto, la configuración ha resultado válida respecto al criterio 1.

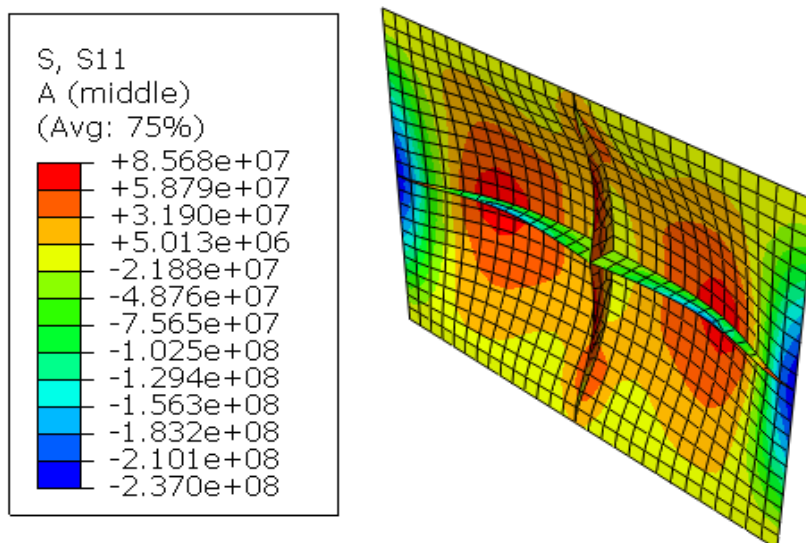


Fig.6.3 Tensión S11 en diseño final mejorado [Pa].

$S_{11c} < X_c/3$	$237 < 365 \text{ [MPa]}$
-------------------	---------------------------

-Por otro lado, se ha observado que este cambio en la geometría de los nervios ha conseguido reducir los desplazamientos de la placa.

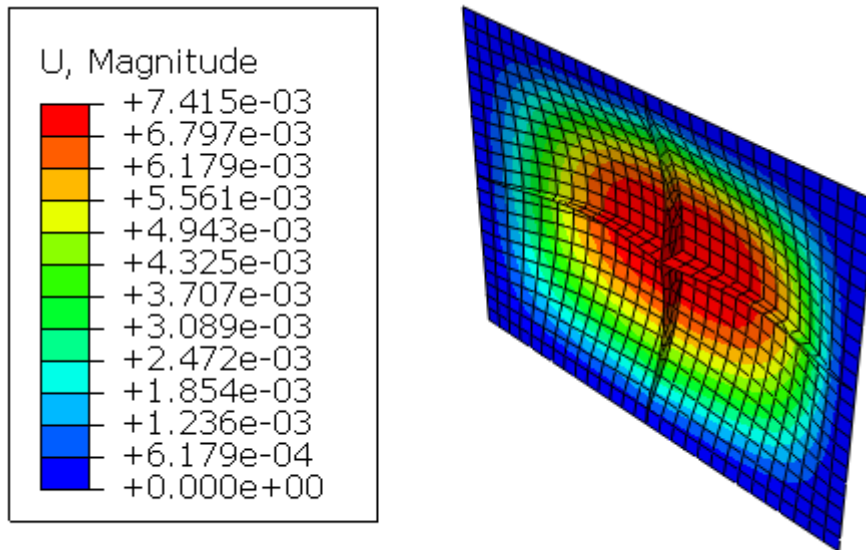


Fig.6.4 Desplazamientos en diseño final mejorado [m].

-Y por último, se ha procedido al cálculo del peso que comprende esta configuración para así poder comparar todos los criterios.

El peso total de la placa ha sido el calculado para la placa sin nervios en el apartado “Placa rectangular. Material compuesto” más el peso adicional de los nervios agregados a la misma.

Masa placa = 92,736 kg

Masa adicional nervios:

$$m_a = 2 \cdot (S_{nc} \cdot h \cdot \rho) + 2 \cdot (S_{nl} \cdot h \cdot \rho) \quad (6.1)$$

$$m_a = 2 \cdot [(0,5 \cdot 1 \cdot 0,12) \cdot 0,0224 \cdot 1380] + 2 \cdot [(0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,12) \cdot 0,0224 \cdot 1380] = 6,4915 \text{ kg} \quad (6.2)$$

Por tanto, la masa total ha adquirido un valor de:

$$m = 92,736 + 6,4915 = 99,22 \quad (6.3)$$

A continuación se han comparado los resultados de la configuración final seleccionada con los obtenidos tras la modificación de los nervios.

TABLA 6.2 COMPARACIÓN PLACA RECTANGULAR SELECCIONADA.

Configuraciones	Peso [Kg]	Desplazamiento máx [mm]
Placa rectangular Material Compuesto Nervios tipo 2	99,53	9,8
Placa rectangular Material Compuesto Nervios tipo 2 modificados.	99,22	7,4

Se ha observado que la variación realizada ha cambiado levemente la masa de la placa reduciéndola y, por otro lado, ha conseguido mejorar los desplazamientos puesto que la flecha máxima de la placa se ha visto disminuida. Por tanto, la variación realizada es favorable y este cambio ha sido añadido a la solución final.

6.3. Presentación de la solución final.

Tras el proceso de diseño llevado a cabo, el estudio de las diferentes posibles soluciones y la mejora de la opción seleccionada, se ha conseguido dar solución al problema propuesto y dotar así de las características que se muestran a continuación a las dos puertas que configuran la entrada diseñada:

TABLA 6.3 CARACTERÍSTICAS SOLUCIÓN FINAL.

Entrada rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2 modificados.	
Geometría	Rectangular
Material	Fibra de carbono
Tipo de refuerzo	Nervios tipo 2 modificados
Espesor de la placa	22,4 mm
Espesor de los nervios	22,4 mm
Masa de la puerta	99,22 kg
Desplazamiento máximo	7,4mm

7. PRESUPUESTO

El presente apartado muestra los costes asociados a la fabricación del diseño de la puerta final. Estos costes incluyen la mano de obra, la materia, los equipos y los costes adicionales del proyecto. Para entender el presupuesto cabe tener en cuenta los siguientes puntos:

- El objetivo temporal de fabricación de la puerta es de 1 mes.
- Todos los operarios realizan jornadas laborales de 8 horas diarias. Cabe destacar que solo los técnicos y supervisión trabajan durante todo el mes todos los días en el proyecto.
- Los sueldos se ajustan al tipo de trabajo de cada operario.
- Un mes tiene 26 días laborales.

TABLA 7.1 PRESUPUESTO MANO DE OBRA

Mano de obra	Precio mano de obra [€/h]	Plantilla [nº de operarios]	Horas [h/operario]	Total [€]
Ingenieros. (Gestión, dirección, logística)	25	3	100	7.500
Técnicos. (Fabricación, operaciones)	9	5	208	9.360
Extra. (Supervisión, organización)	12	2	208	4.992
Total				21.852

TABLA 7.2 PRESUPUESTO MATERIAL Y EQUIPOS.

Material y equipos.	Precio
Fibra de carbono con Epoxy 80€/kg 100kg +Catalizadores	8.000€
Otros materiales. (Disolventes, secantes)	500€
Herramientas. (Material de seguridad, acabado, pulido)	600€
Equipos especializados.	3000€
Total	12100€

Por tanto, el presupuesto total para la fabricación de la puerta es de 33.952€

8. IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO.

El objetivo de explorar y colonizar Marte es perseguido por un gran colectivo de científicos. Los proyectos que se enfocan en crear módulos en los que el ser humano habite el planeta son cada vez más factibles y estudiados para que puedan llevarse a cabo en un futuro no muy lejano.

Los avances en información y exploración del espacio han requerido cuantiosas inversiones de dinero a lo largo de las últimas décadas. La financiación de este tipo de proyectos se lleva a cabo tanto de forma privada como por parte de los propios gobiernos. En concreto, la NASA está en gran parte financiada por el gobierno de EEUU, esta entidad ha realizado numerosas investigaciones y estudios de proyectos para asentarse en Marte. El hecho de llevar a cabo una expedición en la que una tripulación realice un asentamiento en el planeta, requeriría grandes cantidades de dinero que, basándose en todas las inversiones que se han llevado a cabo hasta el momento, numerosos gobiernos y entidades privadas estarían dispuestos a invertir.

En este contexto se habla de invertir ya que el beneficio que se pretende obtener al lograr este propósito colectivo no es solo respecto al avance científico sino que, en gran parte, es beneficio económico. En la actualidad se habla de futuros viajes turísticos al Planeta Rojo e incluso de la creación de un programa de televisión que constituya un *reality show* sobre los tripulantes que convivan en un futuro en Marte, como es el conocido proyecto *Mars One*.

Cada descubrimiento y avance sobre el tema causa un impacto social instantáneo, la población se interesa por conocer más sobre estos avances y los telediarios y revistas centran sus exclusivas en numerosos casos en este tipo de temas científicos. Cabe destacar uno de los últimos titulares que ha podido llegar a todos los rincones del planeta Tierra “Descubren un gran lago de agua salada en Marte”. Estos descubrimientos siguen aumentando las esperanzas y certezas de que en un futuro se logrará habitar el planeta.

El hecho de llegar a lograr un asentamiento en un planeta distinto a la Tierra significaría un gran paso en el ámbito científico y moral para el ser humano. Permitiría la expansión más allá de las fronteras terrestres, lo que conlleva la explotación del terreno marciano, el conocimiento sobre el pasado del planeta y los cambios que este ha sufrido a lo largo del tiempo. Además de esto, facilitaría la investigación para dar respuesta a la pregunta que lleva décadas en mente de los científicos respecto a si Marte ha albergado vida en el pasado. Por otro lado permitiría un nuevo estilo de vida y supondría un gran avance tecnológico para el ser humano.

9. MARCO REGULADOR.

Debido al desarrollo y los avances que se han conseguido en la exploración espacial, en las últimas décadas ha surgido la necesidad de regular este tipo de actividades. Tras el inicio de la exploración espacial por soviéticos (1957) y americanos (1958) surgió el conocido *Committee on the Peaceful Uses of Outer Space* (COPOUS, comité para los usos pacíficos del espacio exterior), creado por la Asamblea General de Naciones Unidas en 1959. [23]

De todo el marco legal creado desde entonces, el más importante es el “Outer Space Treaty” (OST, Tratado del Espacio Exterior), que entró en vigor en 1967 y que ha sido ratificado por 103 estados, su nombre completo es “Tratado sobre los Principios que Deben Regir las Actividades de los Estados en la Exploración y Utilización del Espacio Ultraterrestre, incluso la Luna y otros Cuerpos Celestes” Este fue examinado por la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos y la Asamblea General antes de su . Este Tratado constituye el marco jurídico básico para el derecho internacional del espacio. [23]

Este Tratado reúne 17 artículos cuyos principios se centran en la prohibición de armas de destrucción masiva en cualquier punto del espacio exterior, enfoca la exploración del espacio únicamente con fines pacíficos, prohíbe a cualquier gobierno la reivindicación explícita de recursos procedentes de cualquier cuerpo celeste ya que estos quedan declarados patrimonio de la humanidad, en concreto el artículo II establece que "el espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, no podrá ser objeto de apropiación nacional por reivindicación de soberanía, uso u ocupación, ni de ninguna otra manera" [24]

Así, se entiende que el espacio exterior y los cuerpos más allá de nuestro planeta son propiedad conjunta de toda la humanidad un dominio en el que debe prevalecer la cooperación internacional. Por tanto, no podrán ser reclamados como propiedad ni vendidos. En lo que respecta la ley, es aplicable la Carta de Naciones Unidas y la Declaración Universal de Derechos Humanos. [23]

10. CONCLUSIONES.

10.1. Objetivos cumplidos.

El proceso de diseño llevado a cabo ha permitido dar solución al problema propuesto. Los diferentes métodos y criterios que han sido utilizados han hecho posible descartar soluciones para así seleccionar el resultado que mejores prestaciones ha proporcionado y mejor se ha ajustado a los objetivos marcados.

La información recopilada sobre Marte y las bases teóricas estudiadas y asimiladas sobre los materiales compuestos y sobre libros como *Teoría de Placas y Láminas* de Timoshenko o el manual de *Roark*, han permitido lograr el objetivo de reunir conceptos nuevos sobre la Mecánica de estructuras y enfocarlos así en realizar un proceso de diseño combinando diferentes métodos para conseguir llegar a conclusiones fundamentadas.

Los dos métodos utilizados, método analítico y Método de Elementos Finitos, han sido comparados en los casos de ambas geometrías estudiadas para así poder corroborar la factibilidad de ambos. El método analítico ha permitido un dimensionamiento inicial de la placa tanto en el caso circular como rectangular. En base a los resultados analíticos iniciales ha sido posible continuar el estudio haciendo uso de la herramienta Abaqus. Esta herramienta ha permitido aplicar el Método de Elementos Finitos para analizar los casos de material compuesto y con nervios, ya que las ecuaciones analíticas no ofrecen solución para esos casos. En todo momento se ha tenido en cuenta que los resultados del Método de Elementos Finitos ofrecen cierta variación respecto a los analíticos, sobre todo en casos de magnitudes locales, como son las tensiones, por ello el coeficiente de seguridad utilizado ha permitido resolver el problema de ese margen de error de tal manera que no provoque problemas futuros.

Se ha podido comprobar que la geometría rectangular permite conseguir desplazamientos mucho menores que la geometría circular. Por tanto, esto ha hecho posible que la seguridad y confort por parte de los tripulantes gane calidad.

Por otro lado, tras el estudio de los diferentes materiales, hemos podido observar como la fibra de carbono confiere a la solución una ligereza que no es posible conseguir con ninguno de los metales. A pesar de que el Aluminio aporta buenas propiedades y mejora la propuesta respecto al Titanio y al Acero, el material compuesto ha permitido mejorar sus resultados. Aun teniendo en cuenta el abaratamiento que supondría la utilización del Aluminio, se ha optado por el uso de fibra de carbono ya que es un material de mayor calidad y altas propiedades, además de que aporta la ligereza necesaria para estructuras espaciales.

Por otro lado, una vez estudiados los resultados que se han obtenido respecto a los diferentes tipos de nervios analizados, se ha optado por seleccionar el tipo de nervios

número 2. Esta decisión se ha tomado en base a que los tres tipos de nervios aportan la misma masa adicional a la placa, por lo que el criterio de ligereza no ha sido utilizado en esta elección, sin embargo, cada geometría de nervios ha proporcionado resultados diferentes en cuanto a desplazamientos. Los nervios con geometría más ancha en el centro de la placa han permitido reducir los desplazamientos por debajo de 10mm como marca el criterio. Y, por último, en base a esto, se ha optado por exagerar la geometría de los nervios ensanchándolos más por el centro para así minimizar lo más posible los desplazamientos.

En base a estas premisas se ha llegado a la conclusión final de que la propuesta que mejor ha cumplido los requisitos y criterios impuestos ha resultado ser una modificación del caso 16: Placa rectangular de fibra de carbono con nervios tipo 2 modificados.

10.2. Líneas futuras de trabajo.

El objetivo de llevar a cabo un módulo para habitar Marte no es tarea fácil, con los avances que existen en la actualidad hay numerosas opciones para dar posibles soluciones a este tipo de proyecto. La memoria presente ha pretendido dar una posible solución, la cual hace uso de recursos como los materiales compuestos o el aprovechamiento del conocimiento de la geología marciana para llevar a cabo un asentamiento subterráneo.

El trabajo presente podría completarse en un futuro llevando a cabo el diseño del interior del establecimiento. Las dependencias necesarias para el transcurso de la vida han sido enumeradas pero su distribución y el estudio del espacio interior queda pendiente para futuros proyectos. Gracias a las investigaciones de las últimas décadas, cada vez se conoce más acerca de las necesidades que hacen falta cubrir para que el ser humano pueda viajar y asentarse en el espacio. Estos conocimientos crecen de forma rápida, hecho que hace posible que se lleven a cabo propuestas y estudios cada vez más factibles.

Dentro de las líneas futuras de trabajo, se encuentra también el estudio del sistema de apertura de las entradas. Las puertas han sido estudiadas en su posición cerrada, puesto que es el momento en el que soportan las cargas debido a las diferencias de presión. El sistema de apertura y cierre queda abierto para futuros trabajos en los que podrá debatirse entre diferentes sistemas de apertura y cierre automáticos.

11. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] “Misiones Espaciales”. Centro de Astrobiología LAEFF. [En línea] Disponible en: http://www.laeff.cab.intacsic.es/projects/jwlaeff/docs/index.php?pagename=Education/Outreach/Sistema_Solar/Marte/Misiones_Espaciales
- [2] Ñ. Domínguez, “Hallado un lago de agua bajo el hielo de Marte.” *El País*, 26-julio-2018 [En línea] Disponible en: https://elpais.com/elpais/2018/07/25/ciencia/1532520813_122165.html
- [3] E. García Lama, “Un módulo hinchable en la estación espacial.” *El mundo*, 9-abril-2016 [En línea] Disponible en: <http://www.elmundo.es/blogs/elmundo/apuntesnasa/2016/04/09/un-modulo-hinchable-en-la-estacion.html>
- [4] A. Sabán, “Los principales proyectos y conceptos para colonizar Marte.” *Hipertextual*, 3-Enero-2016 [En línea] Disponible en: <https://hipertextual.com/2016/01/colonizar-marte>
- [5] T. Reichhardt, “Son of Transhab.” *Air and Space*. 17-Enero-2013. [En línea] Disponible en: <https://www.airspacemag.com/daily-planet/son-of-transhab-2210590/>
- [6] S. May, “What is Mars?” *NASA knows! (Grades K-4)*. 7-Agosto-2017. [En línea] Disponible en: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-mars-k4.html>
- [7] Anónimo. “Mars Facts” *Nasa Science. Mars Exploration Program*. [En línea] Disponible en: <https://mars.jpl.nasa.gov/all-about-mars/facts/>
- [8] Anónimo. “Diseña un viaje a Marte. La Atmósfera de Marte.” *Cosmo Educa*. [En línea] Disponible en: <https://www.iac.es/cosmoeduca/sistemasolar/contenido/4.htm>
- [9] A. Miravete. *Materiales Compuestos I*. 1ª ed. Castellón, Zaragoza: INO Reproducciones, 2000.
- [10] Anónimo. “Fibra de carbono.” *Wikipedia. Enciclopedia libre*. 12-Septiembre-2018. [En línea] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono
- [11] Imagen [En línea] Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos81/comportamiento-materiales-compuestos-fibra-carbono/comportamiento-materiales-compuestos-fibra-carbono2.shtml>
- [12] “Materiales Compuestos.” Biblioteca electrónica de Ingeniería. Universidad de Sevilla. [En línea] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+3.pdf>
- [13] J. A. Jurado y S. Hernández. *Análisis Estructural de Placas y Láminas*. 3ª ed. Santiago de Compostela: Andavira, 2014. [En línea] Disponible en: http://www.andavira.com/ebooks/analisis_estructural_placas/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- [14] J. Massa, J. Giro y A. Giudici. “Teoría de placas.” Compendio de cálculo estructural II. FCEFyN. UNC. 2015 [En línea] Disponible en: http://www.cat.calc_est_2_im.efn.uncor.edu/wp-content/uploads/2013/10/Cap-04_PLACAS_65-a-86_v9.pdf
- [15] S. Timoshenko, *Teoría de placas y láminas*. Bilbao, España: Urmo, 1970.
- [16] W. C. Young y R. G. Budynas, *Roark's Formulas for Stress and Strain*. 7ª ed.

Nueva York: McGraw-Hill [En línea]. Disponible en:

http://materiales.azc.uam.mx/gjl/Clases/MA10_I/Roark's%20formulas%20for%20stress%20and%20strain.pdf

[17] “INTRODUCCION AL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS”. Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Material de clase. Capítulo 9. UC3M [En línea] Disponible en: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf

[18] E. Frías Valero “Aportación al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos.” Tesis doctoral. Departamento energía eléctrica UPC, Cataluña 2004 [En línea] Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93606>

[19] Imagen [En línea] Disponible en: http://www.iberisa.com/productos/femap/femap_v103.htm

[20] ABAQUS SIMULIA. 3D CAD Portal. 2015 [En línea] Disponible en: <http://www.3dcadportal.com/abaqus-simulia.html>

[21] MatWeb: Online Materials Information Resource. [En línea] Disponible en: <http://www.matweb.com/>

[22] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*. 1ª ed. Philadelphia: Taylor & Francis, Inc, 1998

[23] D. Navarro Navascués, “La ley del espacio y la exploración espacial.” *OpenMind*. 12-septiembre-2018. [En línea] Disponible en: <https://www.bbvaopenmind.com/la-ley-del-espacio-y-la-exploracion-espacial/>

[24] 2222 (XVI): Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes. UNOOSA [En línea] Disponible en: https://web.archive.org/web/20120530121207/http://www.unoosa.org/oosa/es/SpaceLaw/gares/html/gares_21_2222.html

